



Luís Carlos Sá Pereira de Carvalho Barrão
Licenciado

Avaliação do Comportamento de Misturas Betuminosas sob Temperaturas Elevadas

Dissertação para obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Professor Luís M. T. Quaresma

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Gouveia B. Leal
Arguente(s): Doutora Ana Cristina Freire
Vogal(ais): Engenheiro Luís Trindade Quaresma



Setembro de 2011

Copyright Luís Carlos Sá Pereira de Carvalho Barrão, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Luís Quaresma por me ter proporcionado a oportunidade de realizar este trabalho. A sua orientação científica e generosa disponibilidade foram determinantes na execução do presente trabalho, sem as quais este não teria sido possível.

Ao João Tangarrinha pelo companheirismo e ajuda na elaboração deste trabalho através dos muitos conselhos fornecidos.

A todos os meus colegas engenheiros e futuros engenheiros que de uma forma maior ou menor prestaram o seu contributo para que a realização deste trabalho fosse possível.

À Ana Margarida, por todas as razões, mas em especial pela sua companhia e incentivo e pela sua capacidade de ouvir e resolver os problemas.

Por último, mas não menos importante, aos meus pais, irmão, restantes familiares e amigos, pela dedicação e por me acompanharem ao longo da vida.

Resumo

Uma das principais degradações nos pavimentos rodoviários é a formação de rodeiras resultantes de deformações das camadas constituintes do pavimento e da respectiva fundação, provocadas pela sucessiva passagem de rodados de veículos. Estas deformações se atingirem tamanho significativo põe em causa a segurança dos veículos e consequentemente dos seus ocupantes. Outro factor importante são os elevados custos de reparação relacionados com este fenómeno.

As misturas betuminosas comportam-se como um sólido elástico para temperaturas baixas e/ou tempos de carga reduzidos (elevadas frequências) e comportam-se como um fluído viscoso para temperaturas elevadas e longos tempo de carga (baixas frequências). Para condições intermédias estas misturas apresentam um comportamento intermédio destes dois extremos. Este comportamento é denominado de viscoelástico.

O presente trabalho teve como objectivo final contribuir para uma adequada avaliação da contribuição da deformação permanente das camadas betuminosas para a formação de rodeiras, através de uma metodologia simplificada.

É feita uma avaliação dos modelos de comportamento dos betumes e misturas betuminosas e são referidos vários métodos que permitem obter as temperaturas de serviço num pavimento. É ainda explicitada toda a metodologia que levou à elaboração de um programa capaz de prever a deformação permanente das misturas betuminosas, que permite atender a diferentes condições climáticas, das características dos materiais e de composição e velocidade do tráfego.

Abstract

One of the main road surface degradations is rutting originated from the deformation of the constituent layers of the pavement and its foundation, caused by the successive passage of vehicles tires. If these deformations achieve significant size, they affect the safety of vehicles and consequently its occupants. Another important factor is the high cost of its repair.

The bituminous mixtures behave as an elastic solid for low temperatures and / or reduced load times (high frequencies) and behave like a viscous fluid under high temperatures and long load times (low frequencies). For intermediate conditions such mixtures exhibit an intermediate behavior between these two extremes. This behavior is called viscoelastic.

The present work aims to contribute to the evaluation of the contribution of permanent deformation of bituminous layers for rutting, through a simplified methodology.

An assessment of models to express the behavior of bitumen and asphalt and various methods that enable to obtain the working temperatures in a pavement are presented. It is also detailed the methodology that led to the development of a computer program able to predict the permanent deformation of bituminous mixtures, taking into account different climatic conditions, characteristics of bituminous layers and composition and speed of traffic.

ÍNDICE

1	Introdução	2
1.1	Escolha do Tema	2
1.2	Objectivos e Metodologia	3
1.3	Estrutura do trabalho	4
2	Misturas betuminosas	6
2.1	Tipos de Pavimentos	6
2.2	Exigências de Comportamento	8
2.2.1	Deformação	8
2.2.2	Outras Exigências	11
2.3	Betume	13
2.3.1	Origem do Betume	13
2.3.2	Composição e Constituição do Betume	14
2.3.3	Classificação dos Betumes – Especificação LNEC	18
2.4	Formulação	22
2.4.1	Método Marshall	23
2.4.2	Método CRR	26
2.4.3	Agregados	30
3	Comportamento Viscoelástico	34
3.1	Reologia	34
3.1.1	Definição de Reologia	34
3.1.2	Comportamento Viscoelástico do Betume	35
3.1.3	Modelos Reológicos	38
3.1.4	Carga Dinâmica	45
3.1.5	Efeito Simultâneo Temperatura e Tempo	51
3.2	Ensaaios	54

3.2.1	Viscosímetro Rotativo.....	54
3.2.2	Reómetro de Corte Dinâmico.....	55
3.2.3	Ensaio de Fluência.....	58
3.2.4	Ensaio de Simulação.....	59
4	Temperatura em Pavimentos	62
4.1	Método SHELL.....	62
4.2	Método do Espectro Médio.....	64
4.3	Método PG	67
4.4	Método Localização Geográfica	74
5	Método Simplificado para a Determinação de Deformações Permanentes.....	78
5.1	Descrição do Método	79
5.1.1	Temperatura.....	80
5.1.2	Materiais.....	80
5.1.3	Geometria do Pavimento	84
5.1.4	Acções	84
5.2	Programa DEFPERM.....	86
5.2.1	Estrutura do Programa.....	86
5.2.2	Leitura de Dados	88
5.2.3	Temperatura.....	90
5.2.4	Tráfego	92
5.2.5	Materiais.....	92
5.2.6	Deformação	93
5.2.7	Saída de Resultados.....	94
5.3	Validação do Método	95
5.3.1	Carga Estática.....	95
5.3.2	Carga Dinâmica.....	98
5.4	Caso de Estudo.....	100
6	Considerações Finais e Sugestões para Desenvolvimento Futuro.....	102

6.1	Considerações	102
6.2	Desenvolvimentos Futuros.....	103
7	Bibliografia.....	104

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Constituição dos Betumes (Petersen 1984).....	15
Quadro 2.2 – Classes de betume – Especificação do LNEC (Silva 2005).....	19
Quadro 4.1 - Temperaturas médias mensais do ar no período 1951-1980 (SHELL 1978).....	63
Quadro 4.2 - Temperatura Média Máxima Mensal do ar e Temperatura Média Mínima Mensal do ar, para o mês de Agosto (Aquino 2000)......	65
Quadro 5.1 - Programas computacionais para o cálculo mecânico em pavimentos	78
Quadro 5.2 - Registo de Ensaios de Berhanu (Berhanu 2009).....	82
Quadro 5.3 – Características do Caso de Estudo.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura tipo de um pavimento flexível (Silva 2005).....	7
Figura 2.2 – Aumento da deformação permanente com o número de carregamentos (Houben <i>et al.</i> 1999).....	9
Figura 2.3 – Fases da evolução da deformação permanente em misturas betuminosas (Freire 2002).....	10
Figura 2.4 – Tipos de moléculas presentes no betume (Petersen 1984).....	16
Figura 2.5 – Ensaio de Penetração (Filho 2009)	19
Figura 2.6 – Ensaio Temperatura de Amolecimento (Filho 2009).....	20
Figura 2.7 – Ensaio Viscosidade Cinemática 135° (Filho 2009).....	21
Figura 2.9 – Representação gráfica da variação das características de uma mistura betuminosa com a percentagem de betume com que foram fabricados provetes Marshall (Kraemer 1996).....	26
Figura 3.1 – Resposta viscoelástica para uma carga aplicada (Airey 1997)	35
Figura 3.2 – Resposta viscoelástica para uma carga aplicada (Airey 1997)	37
Figura 3.3 – Mola com comportamento elástico linear (Gardete 2006).....	38
Figura 3.4 – Amortecedor com comportamento viscoso, de acordo com a lei de Newton (Gardete 2006).....	39
Figura 3.5 – Modelo de Maxwell para representação do comportamento viscoelástico (Gardete 2006).....	40
Figura 3.6 – Modelo de Kelvin para representação do comportamento viscoelástico (Gardete 2006).....	41

Figura 3.7 – Modelo de Burgers para representação do comportamento viscoelástico (Gardete 2006).....	42
Figura 3.8 – Resposta do modelo de Burgers quando sujeito a um carregamento com tensão constante durante um determinado período de tempo (Gardete 2006).....	43
Figura 3.9 – Representação das diferentes componentes da deformação de misturas betuminosas e a sua tradução no modelo de Burgers (Gardete 2006).....	44
Figura 3.10 – Desfasamento no tempo entre os valores de tensão e de deformação (Airey 1997)	47
Figura 3.11 – Relação entre Módulo Complexo, Ângulo de Fase, Módulo de Armazenamento e Módulo de Perda (Airey 1997)	48
Figura 3.12 – Curva Mestra (Bernucci <i>et al.</i> 2007).....	52
Figura 3.13 – Diagrama de Black (Bernucci <i>et al.</i> 2007).....	53
Figura 3.14 – Viscosímetro rotativo (Teixeira 2000).....	55
Figura 3.15 – Princípio de funcionamento do RCD (Airey 1997)	55
Figura 3.16 – Definições gráficas de grandezas associadas ao RCD (Airey 1997)	56
Figura 3.17 – Comportamento viscoelástico do betume (Airey 1997)	57
Figura 3.18 – Curva obtida em ensaio com equipamento de simulação de Hamburg (Yildirim & Kennedy 2001)	61
Figura 4.1 – Relação entre a temperatura média mensal do ar ou a temperatura ponderada do ar e o factor de ponderação (SHELL 1978)	64
Figura 4.2 – Relação entre a temperatura ponderada do ar e a temperatura nas camadas betuminosas (SHELL 1978)	Erro! Marcador não definido.
Figura 4.3 – Variação da temperatura de serviço com a profundidade, caso de Castelo Branco (Aquino 2000).....	66
Figura 4.4 – Fiabilidade da Temperatura de Projecto (SHRP 1994a).....	70
Figura 4.5 – Exemplos de Variação de Altas e Baixas Temperaturas do Ar (SHRP 1994a).....	70
Figura 4.6 – Exemplo de Variação de Altas e Baixas Temperaturas do Pavimento (SHRP 1994a)	71
Figura 4.7 – Selecções da Graduação de Ligante Asfáltico SUPERPAVE para Cleveland (SHRP 1994a).....	72
Figura 5.1 – Relações entre do programa DEFPERM	79
Figura 5.2 – Programa “LAB FIT Ajuste”	82
Figura 5.3 – Relação entre a temperatura e cada um dos parâmetros viscoelásticos para o material SMA G.....	83
Figura 5.4 – Fluxograma DEFPERM.....	87
Figura 5.4 – Ficheiro de dados	88
Figura 5.5 – Variáveis de entrada e saída da subrotina CALEND.....	89
Figura 5.13 – Opções do programa DEFPERM.....	90
Figura 5.5 – Variáveis de entrada e saída da subrotina TMINMAX.....	91
Figura 5.5 – Variáveis de entrada e saída da subrotina TEMPERAT	91

Figura 5.5 – Variáveis de entrada e saída da subrotina TRAFEGO.....	92
Figura 5.5 – Variáveis de entrada e saída da subrotina MATERIAIS	93
Figura 5.5 – Variáveis de entrada e saída da subrotina DEFPERM.....	94
Figura 5.5 – Ficheiro de resultados	94
Figura 5.6 – Estrutura e características do modelo de comparação (Ferreira 2001)	95
Figura 5.7 – Resultado do modelo de comparação para carga estática (Ferreira 2001).....	96
Figura 5.8 – Resultados DEFPERM para três subdivisões de camadas – carga estática	97
Figura 5.9 – Percorso efectuado pela carga dinâmica para o modelo de comparação (Ferreira 2001).....	98
Figura 5.10 – Resultado do modelo de comparação para carga estática (Ferreira 2001).....	99
Figura 5.11 – Resultado do programa DEFPERM para carga dinâmica.....	99
Figura 5.12 – Ficheiro de dados do caso de estudo.....	100
Figura 5.14 – Ficheiro de resultados para o caso de estudo	101

1 INTRODUÇÃO

1.1 Escolha do Tema

Um dos grandes problemas nos pavimentos rodoviários é a formação de rodeiras. As rodeiras são deformações típicas dos pavimentos provocadas pela sucessiva passagem de rodados de veículos. Estas deformações se atingirem tamanho significativo põe em causa a segurança dos veículos e consequentemente dos seus ocupantes, daí ser da maior importância evitar que tal suceda.

As deformações num pavimento resultam das contribuições das deformações das suas camadas e da sua fundação, ou seja, resultam das deformações das camadas betuminosas e das deformações das camadas não ligadas. Quando estes valores comprometem a segurança rodoviária, são necessárias medidas para alterar a geometria superficial do pavimento.

A reparação de um pavimento cujas camadas betuminosas tenham um comportamento inadequado implicam em geral a remoção dessas camadas por fresagem e substituição por materiais adequados. Dado que o custo de um pavimento é essencialmente condicionado pelo custo das camadas betuminosas, é fundamental do ponto de vista económico um comportamento adequado, de forma a evitar rodeiras.

As deformações das misturas betuminosas são muito influenciadas pela temperatura, sendo que é para os valores de temperaturas elevadas que as deformações atingem situações mais problemáticas.

1.2 Objectivos e Metodologia

Este trabalho tem como finalidade avaliar o comportamento das misturas betuminosas no seu geral, exercendo maior atenção no seu comportamento para temperaturas elevadas de serviço, uma vez que, em função da localização geográfica de Portugal, são as que mais condicionam a escolha de uma mistura. Uma das consequências de maior relevo originadas pelas temperaturas sobre as misturas, e consequentemente sobre os pavimentos, é a deformação. Esta condiciona de forma determinante a utilização de uma estrada. Então como objectivo deste trabalho pretendeu-se determinar como a temperatura influencia a deformação das misturas betuminosas.

Para o efeito, foram analisados diversos modelos reológicos tendo-se optado por um que permitisse calcular as deformações tendo em conta o comportamento viscoelástico linear das misturas betuminosas.

Para ter em conta o efeito da temperatura, de acordo com a análise de trabalhos neste domínio, existe a possibilidade de prever a temperatura ao longo da espessura das camadas betuminosas atendendo à localização geográfica à hora em análise dentro do período anual.

Também foram considerados os efeitos de uma distribuição não uniforme de tráfego, bem como da velocidade de circulação dos veículos.

Uma vez que se pretende que esta avaliação possa ter uma aplicação mais massificada por parte de outros utilizadores, este trabalho teve como objectivo final elaborar um programa que seja capaz de prever a deformação das misturas betuminosas com particular atenção às altas temperaturas. Com o intuito de se proceder à elaboração de um exemplo de aplicação do programa DEFPERM procedeu-se à elaboração de um caso de estudo. Este caso teve ainda como objectivo a tentativa de aproximação a uma situação o mais semelhante possível com a realidade rodoviária.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado em seis capítulos – incluindo este primeiro capítulo, que contém uma introdução geral e a justificação para a escolha do tema – mais a bibliografia que será a sétima parte. Este capítulo define ainda os objectivos deste trabalho, apresenta a metodologia e explicita a sua estrutura.

O capítulo 2 está subdividido em quatro partes: Tipos de Pavimentos; Exigências de Comportamento; Betume e Formulação. Nos Tipos de Pavimentos é apresentada a distinção entre os diversos tipos de pavimentos e as principais características de cada camada. Em Exigências de Comportamento, como o próprio nome indica, são apresentados os parâmetros exigidos às misturas, com especial destaque para a deformação. Em Betume é dado a conhecer o material betume e as suas principais características e em Formulação são explicados alguns métodos para definir as misturas.

O capítulo 3 procura explicar melhor este tipo de comportamento, sendo também incluídos os comportamentos elástico e viscoso. Este capítulo numa primeira fase, Reologia, faz essa explicação, deixando para uma segunda parte os ensaios mais utilizados na caracterização deste tipo de comportamento.

O capítulo 4 faz referência a alguns métodos de previsão de temperaturas em pavimentos existentes.

O capítulo 5 está relacionado com o programa DEFPERM que tem como objectivo calcular a deformação permanente para um determinado pavimento. É feita uma apresentação sobre o mesmo, bem com uma calibração aos seus resultados. É ainda apresentado um caso para aplicação do projecto.

No capítulo 6 são sintetizadas as principais conclusões deste trabalho, bem como sugeridos futuros trabalhos que de alguma forma possam dar continuidade ao trabalho efectuado nesta área.

2 MISTURAS BETUMINOSAS

2.1 Tipos de Pavimentos

Consoante a deformabilidade das camadas dos pavimentos, é habitual agrupá-los em duas categorias: os pavimentos rígidos e os flexíveis.

Os primeiros são pavimentos pouco deformáveis em que a principal função, estrutural, é assegurada por uma laje de betão de cimento ($E=20000$ a 30000 MPa). A elevada resistência à flexão deste elemento conduz a que as cargas exteriores sejam rapidamente distribuídas, de tal modo que a profundidade relativamente pequena às tensões verticais transmitidas ao solo de fundação assumem valores compatíveis com a resistência deste.

Nos pavimentos flexíveis as camadas são de materiais mais deformáveis (materiais betuminosos com E da ordem de 3000 a 7000 MPa; camadas granulares com E da ordem de 200 a 500 MPa) que degradam as cargas mais lentamente, exigindo, por isso, espessuras maiores para as reduzir, ao nível da fundação, a valores adequados.

Existe ainda uma terceira categoria de pavimentos, menos utilizada, que engloba os pavimentos denominados de “semi-rígidos”. Estes pavimentos consistem no uso de bases tratadas com ligantes hidráulicos, em especial o cimento. Neste caso, está-se perante uma camada de rigidez relativamente grande para um pavimento flexível, daí a sua designação.

No âmbito deste trabalho é dada mais ênfase à utilização de pavimentos flexíveis, uma vez que são os mais utilizados na maioria das situações. Serão por isso, um pouco mais detalhados.

Os pavimentos flexíveis incluem, essencialmente, três tipos de camadas:

- A camada ou as camadas mais superficiais, que asseguram um papel funcional e um papel estrutural. São, em geral, constituídas por betões betuminosos ou outras misturas betuminosas. No caso de estradas com tráfego reduzido podem limitar-se a um simples tratamento superficial betuminoso que não desempenha função estrutural.

- A camada de base, que assegura essencialmente um papel estrutural, distribuindo e reduzindo as tensões sobre a sub-base e o solo de fundação. É formada por misturas betuminosas, podendo em estradas de tráfego menos intenso e pesado ser formada só por materiais granulares (britados) geralmente de granulometria extensa.

- A sub-base, que assegura o apoio da base e, em particular, permite a sua adequada compactação, também é colocada para defender o solo de fundação da acção do tráfego de obra. Desempenha às vezes também uma acção drenante e anti-contaminante, no sentido de evitar a penetração dos finos do solo de fundação na camada de base, se esta for granular. É, em geral, formada por materiais do tipo dos indicados para bases granulares, embora as especificações admitam uma qualidade inferior.

Nos pavimentos flexíveis, que vão ser muito mais sobrecarregados, é por vezes necessário ponderar o uso de camadas de base bastante mais resistentes. Em Portugal isto é feito recorrendo a bases betuminosas (que mantêm o carácter de grande deformabilidade característica dos pavimentos flexíveis).

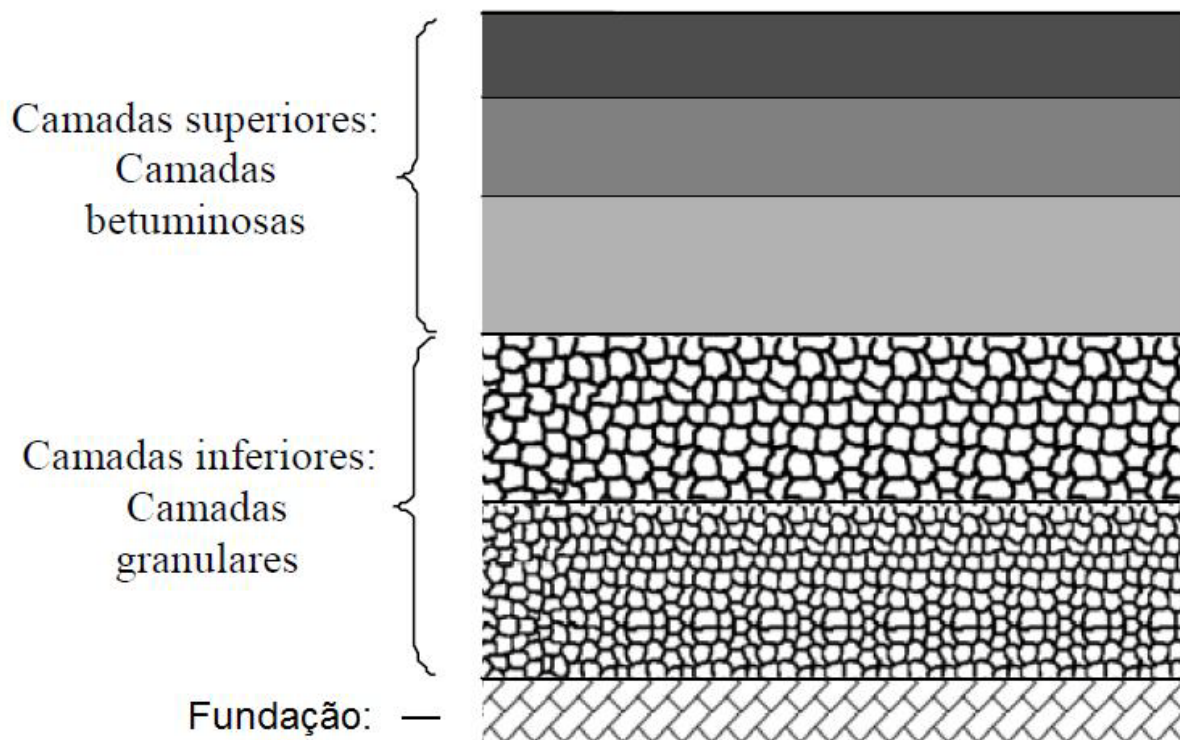


Figura 2.1 – Estrutura tipo de um pavimento flexível (Silva 2005)

2.2 Exigências de Comportamento

As misturas betuminosas, por se encontrarem na parte superior, constituem as principais camadas de um pavimento. Como tal, têm de ser dotadas de diversas capacidades, de forma a poderem resistir a todas as solicitações a que estarão sujeitas.

Consoante o tipo de camada de pavimento a construir, pode pretender-se o uso de misturas em que as boas características mecânicas sejam a principal exigência ou, por outro lado, usar misturas que, fundamentalmente apresentem aptidão para o desempenho de funções que têm a ver com a segurança e o conforto dos utentes da via. Em qualquer dos casos devem ser garantidos determinados critérios de economia, durabilidade e facilidade de execução.

2.2.1 Deformação

A deformação permanente verificada numa camada betuminosa é o somatório de duas componentes. Por um lado a sobrecompactação (densificação) da camada, que provoca uma diminuição de vazios e um correspondente assentamento à superfície. Por outro lado, as deformações ocorridas por tensões de corte na camada betuminosa, devido aos efeitos das cargas do tráfego, que provocam essencialmente deformações a volume constante. A contribuição de cada uma destas componentes depende de diversos factores, no entanto, o aparecimento de rodeiras por deformação permanente de misturas betuminosas resulta principalmente de deformações por corte (SHRP 1994a).

Existe uma diferença temporal entre a ocorrência da contribuição por deformação por corte e por densificação. A densificação ocorre durante a fase inicial de serviço do pavimento, em que o abaixamento que ocorre na zona de passagem dos rodados é superior às elevações que ocorrem dos lados. Após esta fase inicial, são as deformações por corte que contribuem para a deformação permanente. Nesta fase verifica-se que a um abaixamento na zona dos rodados corresponde um crescimento nas elevações laterais com praticamente o mesmo volume. Pode considerar-se que esta fase se prolonga durante toda a vida do pavimento, no entanto a formação de rodeiras devido a deformações permanentes em misturas betuminosas ocorre mais rapidamente no início da vida útil do pavimento, quando o betume ainda é jovem e em condições climatéricas de temperaturas elevadas.

Outra questão importante é a deformação permanente ir aumentando com o número de carregamentos, isto é, a deformação permanente aumenta com a quantidade de rodados que solicitam o pavimento (SHRP 1994a). No entanto, a evolução da deformação permanente com o número de carregamentos é não linear, como se pode observar na figura 2.2.

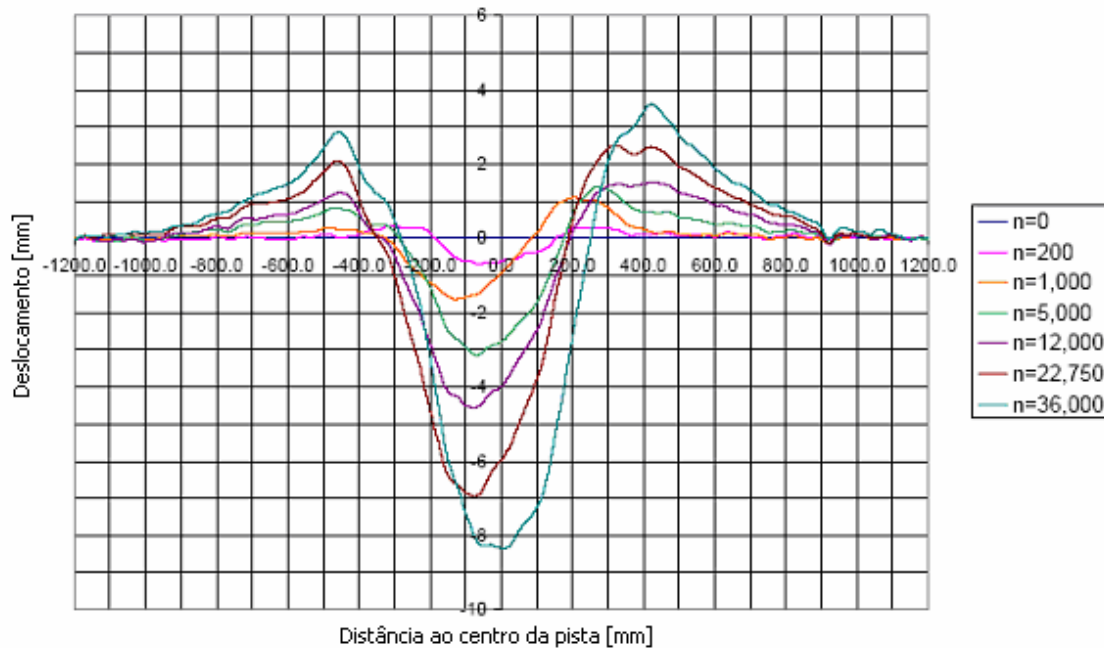


Figura 2.2 – Aumento da deformação permanente com o número de carregamentos (Houben *et al.* 1999)

A evolução da deformação permanente em camadas betuminosas apresenta três fases características (Zhou *et al.* 2004). Uma primeira fase caracteriza-se pelo acréscimo de deformação por carregamento ser elevado. Este comportamento explica-se pela deformação verificada não ser só devido a deformação por tensões de corte mas por existir também densificação na camada betuminosa. Esta densificação da mistura betuminosa aumenta a resistência à deformação permanente pois melhora os contactos entre os agregados e processa-se até a mistura ter resistência suficiente para suportar as cargas sem sofrer mais redução de volume, passando as deformações a ocorrer a volume constante.

Numa segunda fase o acréscimo de deformação permanente por carregamento é inferior ao da fase anterior e toma um valor quase constante. Nesta fase as deformações ocorrem a volume constante devido a tensões de corte. A deformação evolui de uma forma quase linear com o número de carregamentos durante esta fase.

Na terceira fase ocorre a designada rotura, em que o acréscimo de deformação por carregamento aumenta drasticamente entrando-se no domínio das grandes deformações por corte. Na figura 2.3 representa-se a evolução típica da deformação permanente com a identificação das diferentes fases. Na prática, é possível sob diversas condições que não ocorram uma ou mais fases.

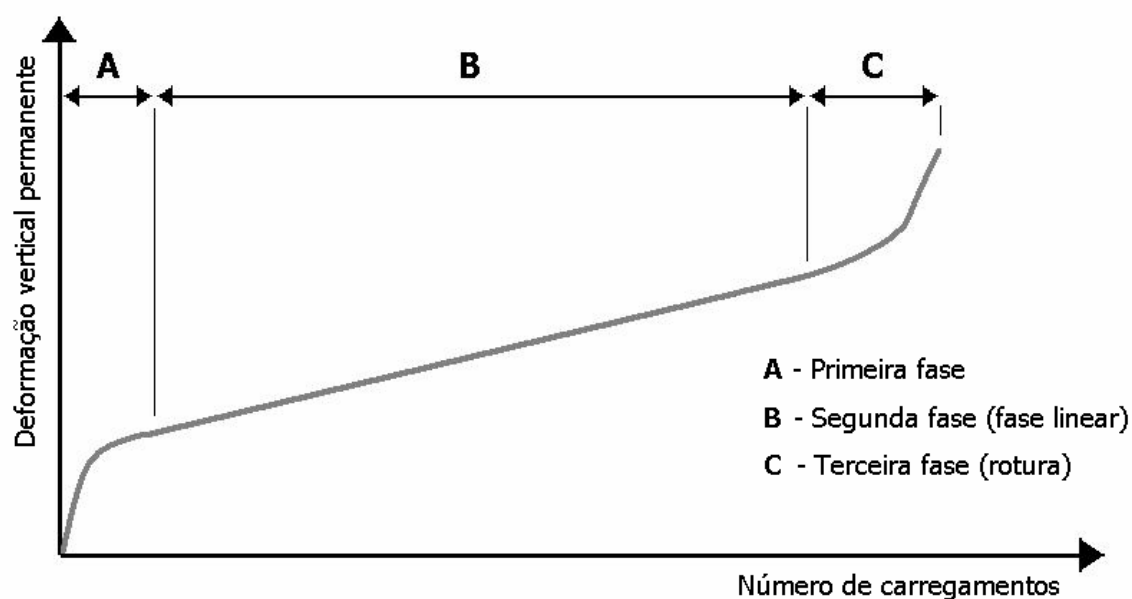


Figura 2.3 – Fases da evolução da deformação permanente em misturas betuminosas (Freire 2002)

É exigido às misturas um adequado dimensionamento de forma a garantir ao longo da sua vida útil baixas deformações.

2.2.2 Outras Exigências

Não só exigências relacionadas com a deformação são pedidas às misturas betuminosas. Em termos gerais, são-lhe também exigidas as seguintes características: durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade.

- Durabilidade

A durabilidade de uma mistura betuminosa pretende caracterizar a sua resistência à desintegração causada pelas solicitações climáticas e pelo tráfego. O betume pode, por exemplo, sofrer oxidações ou perda de componentes por volatilização, enquanto que o agregado pode sofrer danos devidos a ciclos de gelo/degelo (o que raramente acontece no nosso país). Em geral, quanto maior for a quantidade de betume utilizada, maior será a durabilidade da mistura. A utilização de materiais de granulometria contínua, bem compactados, que resultem em misturas impermeáveis, melhoram a durabilidade. Ultimamente, tem-se procurado utilizar maiores percentagens de betume com o objectivo de obter uma película de ligante mais espessa a revestir os agregados, de modo a retardar o envelhecimento daquele. Além disso, esse aumento produz uma redução do tamanho dos vazios e dos “canais de comunicação” entre eles, tornando mais difícil a entrada de ar e água para o interior da mistura. Para obter uma boa resistência à água, para além de ser necessário produzir misturas densas, com elevadas percentagens de betume, é conveniente que os agregados mantenham o revestimento de ligante na presença da água. Acresce que a quantidade de betume usada deve ser a suficiente para agregar convenientemente os materiais granulares, de modo a que a acção abrasiva do tráfego não produza o arrancamento dos materiais. Aliás, deste ponto de vista seria conveniente preencher completamente os vazios da mistura de agregados com betume. Contudo, como se referiu, isso seria inconveniente para a estabilidade da mistura. Assim, há que estabelecer um compromisso, mantendo a percentagem de betume tão elevada quanto possível, sem prejudicar demasiadamente a estabilidade da mistura.

- Flexibilidade

A flexibilidade de uma mistura tem que ver com a sua capacidade para se adaptar gradualmente aos movimentos do seu suporte. Ocasionalmente, ocorrem assentamentos diferenciais dos aterros, motivados por compactações não uniformes durante a sua construção. Além disso, algumas zonas do pavimento tendem a comprimir-se sob a acção do tráfego, dando-se

assentamentos. No entanto, esses fenómenos devem ocorrer sem que haja fissuração do pavimento. Daí a necessidade de produzir misturas flexíveis. Geralmente, a flexibilidade das misturas aumenta com o aumento da percentagem de betume, melhorando também com a utilização de agregados de granulometria relativamente aberta.

- Resistência à Fadiga

A fadiga nos pavimentos rodoviários é um fenómeno originado pela passagem repetida de veículos que induzem nos materiais ligados extensões constituídas por duas componentes: uma reversível (ou elástica) e outra irreversível (ou plástica). Embora em cada aplicação do carregamento os níveis das extensões sejam consideravelmente mais baixos dos que induzem a imediata rotura do material, a acumulação sucessiva de extensões irreversíveis acaba por provocar a abertura de fendas. Uma mistura betuminosa resiste tanto melhor quanto maior for a durabilidade (e, portanto, o teor em betume). Além disso, as misturas densas têm um melhor desempenho que as abertas, sendo conveniente a utilização de materiais bem graduados, mas que permitam a utilização de elevados teores em betumes em que ocorra exsudação do ligante.

- Aderência

Particularmente com o tempo de chuva, as superfícies dos pavimentos devem apresentar boas características de aderência. Para tal, é conveniente não utilizar betume em excesso, para que este não exsude, de modo a originar uma superfície demasiadamente lisa. É também importante escolher agregados com textura superficial rugosa e que tenham boa resistência ao desgaste, de modo a manterem essa rugosidade. É fundamental promover uma boa e rápida drenagem superficial.

- Impermeabilidade

Uma mistura betuminosa deve oferecer uma boa resistência à passagem da água e do ar pelo pavimento. Normalmente, a quantidade de vazios é uma boa indicação da impermeabilidade de uma mistura betuminosa compactada, embora a interligação dos vazios e o seu contacto com a superfície do pavimento tenham maior importância na aferição daquela característica.

- Trabalhabilidade

É, sem dúvida, importante fabricar um material com as características desejadas. No entanto, é também fundamental que esse material possa ser colocado e compactado com facilidade. Normalmente, o respeito pelas regras de operação dos equipamentos e a correcta formulação da mistura permitem resolver as questões relativas à trabalhabilidade dos materiais. Contudo, em determinadas situações, a utilização de alguns agregados com o objectivo de melhorar a estabilidade, tornam as misturas difíceis de colocar. Esses problemas, normalmente detectados na fase inicial de aplicação, podem solucionar-se procedendo a um ajuste da formulação da mistura (Asphalt Institute 1983)

2.3 Betume

2.3.1 Origem do Betume

As misturas betuminosas na sua constituição englobam um constituinte que tem como principal finalidade juntar todos os seus componentes de forma a torna-la como uma substância única. Nas misturas betuminosas o constituinte responsável por essa função é o betume, ou qualquer outra substância da “família” dos betumes. Ou seja, o betume está para as misturas betuminosas assim como o cimento está para os betões.

O betume é um aglutinante betuminoso, de cor escura, obtido a partir do petróleo bruto (crude), depois de removidos os seus componentes voláteis restando assim o betume. Cada crude é específico do local onde é removido, apresentando características próprias, não sendo por vezes compatíveis com as características necessárias para um bom betume (Zakar 1971).

Um dos processos mais usados para a produção de betume é a destilação directa do crude. As fracções mais leves do crude permanecem em estado de vapor, enquanto as mais pesadas, de elevada massa molecular, são extraídas sob a forma de resíduo. O produto recuperado é conhecido por “bruto reduzido”. No passo seguinte, o material obtido é aquecido a uma temperatura entre 350° C e 400° C e é submetido a uma pressão negativa entre 10 mm e 100 mm de mercúrio. A pressão usada destina-se a obter uma separação física dos constituintes sem os degradar

termicamente, obtendo-se desta forma o segundo resíduo que é utilizado no fabrico dos diferentes betumes (Lombardi 1993).

Apesar de o betume ter esta grande aplicação ao nível das misturas betuminosas, ela nem sempre foi possível uma vez que o betume não sendo um material natural, nem sempre esteve disponível para ser aplicado. O início da utilização massificada do betume deu-se a partir do final do século XIX. Até então, essa função durante muito tempo coube a um produto com características semelhantes às do betume denominado: o asfalto.

O asfalto é um material natural que se pode encontrar depositado em lagos cuja sua formação está relacionada com profundas alterações geológicas ao longo de grandes períodos de tempo. Alguns dos locais de depósito de asfalto mais conhecidos ficam situados nas Bermudas, Trinidad e Tobago, Venezuela, Estados Unidos da América, Canadá e Angola (Attwoll & Broome 1962).

Existe ainda um segundo produto natural de características semelhantes ao betume denominado de rocha asfáltica. A rocha asfáltica aparece na natureza como o resultado da junção entre asfalto e rocha calcária. Este produto encontra-se depositado em minas e em pedreiras, cujas principais localizações se encontram em França, Suíça e Itália (SHELL 1991).

Quer não só o asfalto, quer a rocha asfáltica foram bastante utilizados desde meados do século XIX até ao aparecimento de novas técnicas de destilação do crude e, por conseguinte, ao surgimento do betume. Sobretudo ao nível rodoviário existe nos dias de hoje pouco recurso a estes materiais, sendo incluído nas misturas betuminosas essencialmente betume (Whiteoak 2003).

2.3.2 Composição e Constituição do Betume

Composição

A constituição de um betume, não é algo que seja facilmente definido uma vez que não é uma substância de simples classificação. Devido ao facto de os betumes serem obtidos a partir da destilação do crude, e este poder ter diversas proveniências, a constituição do betume vai variar em função do local onde é recolhido o crude. Ou seja, a constituição do betume depende da fonte do crude (Whiteoak 2003).

O betume é basicamente composto por moléculas de hidrocarbonetos (compostos constituídos pelos elementos carbono e hidrogénio) bastante extensas, com baixas quantidades de enxofre, azoto e oxigénio. Estes três últimos elementos são denominados de heteroátomos (Romberg *et al.* 1959; Traxler 1936). As estruturas destas moléculas podem ainda considerar ínfimas quantidades de metais pesados como o níquel, vanádio, ferro, magnésio e cálcio. A presença não só destes elementos, como também dos heteroátomos nos betumes vai ter influência, dependendo da sua percentagem de constituição, nas características dos betumes (Petersen 1984). As percentagens dos componentes na constituição dos betumes não é fixa, contudo existem referências máximas e mínimas para estes valores. Essas referências são as seguintes:

Quadro 2.1 - Constituição dos Betumes (Petersen 1984)

Elemento	Mínimo (%)	Máximo (%)
Carbono	82	88
Hidrogénio	8	11
Enxofre	0	6
Oxigénio	0	1,5
Azoto	0	1

Apesar do conhecimento da composição química dos betumes ser necessária na sua melhor composição, é insuficiente se queremos perceber melhor a reologia deste material e a sua resposta a determinadas solicitações. É necessário perceber também o modo como estas moléculas se ligam e como estas ligações vão influenciar as características dos betumes (Petersen 1984).

Constituição

Viu-se até agora que as diferentes constituições de betumes influenciam as suas características tornando-as diferentes em função do local onde foi recolhida a matéria prima do betume. Mas não menos importante que a constituição química das moléculas que formam o betume, é o modo como estas moléculas se organizam. Também nesta organização, à semelhança do que acontecia com a sua constituição, a proveniência do crude é decisiva. Dois tipos de crude

recolhidos em dois locais distintos, muito provavelmente irão ter uma organização molecular diferente e por conseguinte irão apresentar características diferentes.

As moléculas que constituem os betumes são bastante diversificadas. Elas podem ir desde longas cadeias de hidrocarbonetos não polares e não aromáticos até estruturas aromáticas e com uma forte polaridade contendo uma enorme variedade de heteroátomos como enxofre, oxigénio e azoto (Petersen 1984). Face a esta variedade, justificada pelo facto de existirem diversas fontes de recolha de crude, é muito difícil definir uma estrutura tipo para todos os betumes. Contudo, após algumas pesquisas foi possível identificar a existência de alguns grupos funcionais com alguma frequência e com determinadas características.

Os três principais tipos de moléculas que se podem encontrar no betume são os alifáticos, os cíclicos e os aromáticos. As moléculas alifáticas são cadeias moleculares lineares, tridimensionais e têm uma natureza oleosa. As cíclicas são anéis tridimensionais de átomos de carbono saturados (todas as ligações disponíveis estabelecidas) com vários átomos de hidrogénio. As moléculas aromáticas, são anéis de átomos de carbono estáveis e bidimensionais que facilmente se sobrepõem em camadas. Todos estes tipos de moléculas interagem de várias formas de modo a afectar o comportamento químico e físico de um betume.

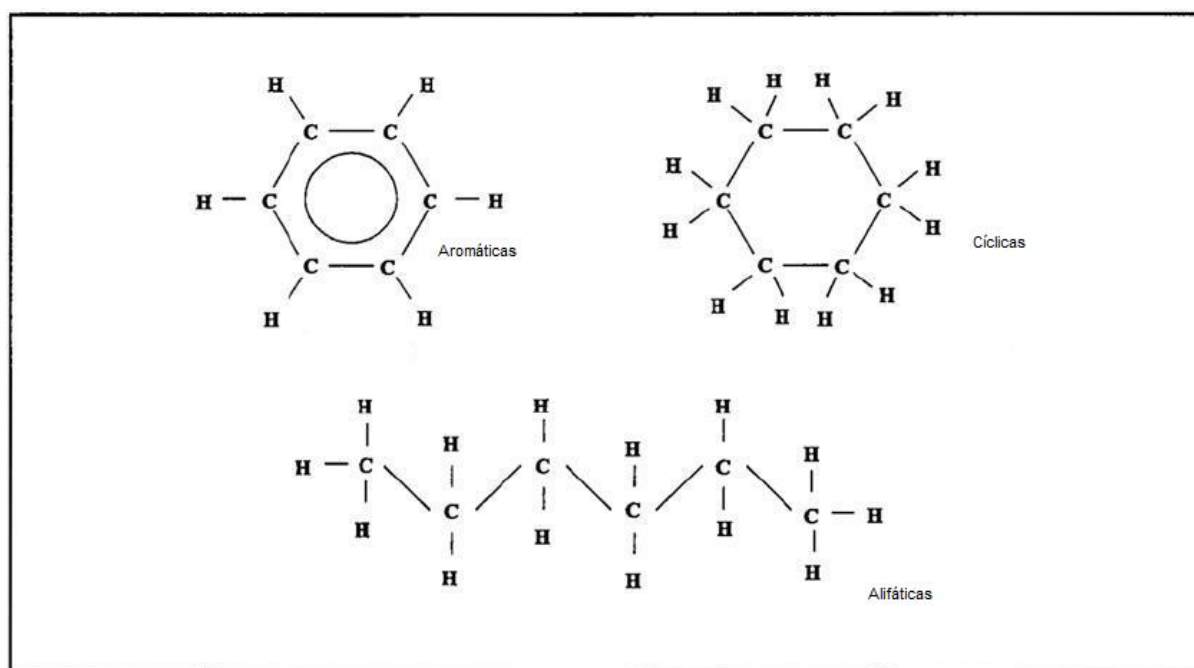


Figura 2.4 – Tipos de moléculas presentes no betume (Petersen 1984)

As ligações químicas inter-moleculares são relativamente fracas e facilmente quebradas pelo calor e tensão de corte, o que explica as propriedades viscoelásticas do betume. Quando o betume é aquecido as ligações inter-moleculares começam a ser quebradas. Quando se dá o arrefecimento estas ligações são restabelecidas e refaz-se a estrutura molecular, não necessariamente a mesma que antecedia o aquecimento.

O número de moléculas nos betumes com diferentes estruturas químicas é muito elevado. Separar e identificar todas moléculas seria uma tarefa extremamente complicada. Aquilo que alguns químicos têm feito é procurar diversas técnicas de separar os principais grupos dos constituintes do betume. Esses grupos são constituídos tendo por base critérios como o tamanho da molécula, a sua reactividade química e a polaridade.

Uma das principais técnicas desenvolvidas para separar os constituintes do betume foi levada a cabo por Corbett (Corbett 1969). Neste método começa-se por separar os asfaltenos com base na sua insolubilidade ao n-heptano. Após a precipitação destes, os produtos restantes (maltenos) são absorvidos numa coluna cromatográfica e de seguida expelidos com solventes que aumentam a polaridade. Após alguns ciclos de absorção e dessorvição os maltenos são subdivididos em três fracções com aumento de polaridade (Whiteoak 2003). Estas três fracções são denominadas de saturados, aromáticos e resinas. De referir que estas fracções representam grupos de moléculas que têm bastantes características em comum, mas que não são todas iguais entre si.

Os asfaltenos são sólidos amorfos, de cor preta ou castanha, que são insolúveis ao n-heptano, em que alguns átomos de azoto, enxofre e oxigénio são adicionados aos átomos abundantes de carbono e hidrogénio (Airey 1997). A característica que mais distingue esta fracção das outras é a preponderância de moléculas com elevada condensação planar e sistemas cíclicos aromáticos e polarizáveis, associarem-se a elevadas concentrações de heteroátomos polares contendo grupos funcionais (Petersen 1984). Devido a isto as moléculas desta fracção estão fortemente ligadas e são dificilmente dispersas em solventes polares. Os asfaltenos têm uma grande influência nas propriedades reológicas do betume. O aumento da percentagem de asfaltenos vai levar o betume a apresentar características mais viscosas tendo como consequência nos seus ensaios menores valores de penetração e maior temperatura de anel e bola. A percentagem de asfaltenos no betume varia entre os 5-25% (Whiteoak 2003).

Os aromáticos são solúveis em n-heptano e abrangem as moléculas mais leves de compostos aromáticos no betume. Eles são viscosos/líquidos geralmente de cor castanha escura, que usualmente contêm sistemas cíclicos aromáticos e não aromáticos condensados, contendo

ainda os heteroátomos enxofre, oxigénio e azoto. Os aromáticos constituem 40 a 65% do total do betume (Whiteoak 2003).

As resinas, igualmente solúveis em n-heptano, são quimicamente idênticas aos asfaltenos. Elas são sólidas ou semi-sólidas, escuras, e têm uma natureza extremamente polar o que lhes confere boas capacidades adesivas. As resinas também são conhecidas por serem agentes dispersores ou sintetisantes de asfaltenos. Então, através da proporção de resinas para asfaltenos podemos determinar se o betume apresenta um comportamento mais próximo do comportamento de um sólido, ou se apresenta um comportamento mais próximo do comportamento de um líquido (Whiteoak 2003).

Os saturados são óleos viscosos não polares com um peso molecular semelhante aos aromáticos. A fracção saturada pode conter hidrocarbonetos normais saturados, hidrocarbonetos de cadeia ramificada e hidrocarbonetos cíclicos saturados. Por vezes pode ser também verificada nesta fracção uma pequena quantidade de hidrocarbonetos aromáticos monocíclicos. Contudo, as propriedades destas moléculas monocíclicas são determinadas pela adição de cadeias laterais saturadas de hidrocarbonetos (Petersen 1984). Os saturados geralmente constituem entre 5 a 20% da totalidade do betume.

2.3.3 Classificação dos Betumes – Especificação LNEC

Os ensaios empíricos/convencionais visam sobretudo medir a consistência em que se encontra o betume. Uma vez que o betume é um material termoplástico, a sua consistência varia com a temperatura. Assim, se as comparações são feitas para diferentes betumes, é necessário medir a consistência destes para a mesma temperatura.

Após a classificação destes ensaios é possível agrupar o betume por classes. A Norma Europeia NP EN 12591- “Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens” define as classes indicadas no Quadro 2.2. As classes dos betumes tomam o nome dos extremos do intervalo do ensaio de penetração. Por exemplo, o betume do tipo 35/50 tem para o ensaio de penetração o valor mínimo de 35 décimos de milímetro (3,5 mm) e o valor máximo de 50 décimos de milímetro (5 mm).

Quadro 2.2 – Classes de betume – Especificação NP EN 12591

Propriedades [condições de ensaio]		Métodos de ensaio		Tipos de betumes e exigências de conformidade							
				10/20	20/30	35/50	50/70	70/100	100/150	160/220	250/300
Penetração (0,1 mm) [25°C; 100g; 5s]		EN 1426 [ASTM D 5]	Min	10	20	35	50	70	100	160	250
			Máx	20	30	50	70	100	150	220	330
Temperatura de amolecimento (°C)		EN 1427 [ASTM D 36]	Min	63	55	50	46	43	39	35	30
			Máx	76	63	58	54	51	47	43	38
Viscosidade cinemática (mm ² /s) [135°C]		EN 12595 D 2170]	[ASTM Min	1000	530	370	295	230	175	135	100
Solubilidade em tolueno ou xileno (%)		EN 12592 2042, modificada]	[ASTM D Min	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0
Temperatura de inflamação (°C)		EN 22592 D 92]	[ASTM Min	250	240	240	230	230	230	220	220
Resistência ao endurecimento [RTFOT ou TFOT]	Variação de massa (%; ±)	RTFOT: EN 12607-1 [ASTM D 2872] ou TFOT: EN 12607-2 [ASTM D 1754]	— Máx	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	1,0	1,0
	Penetração (% p.o.) ^a [25°C; 100g; 5s]		EN 1426 [ASTM D 5] Min	60	55	53	50	46	43	37	35
	Temperatura de amolecimento (°C)		EN 1427 [ASTM D 36] Min	65	57	52	48	45	41	37	32
	Aumento da temp. de amolecimento (°C)		b Máx	8	10	11	11	11	12	12	12

2.3.3.1 Ensaio Penetração a 25°C

O ensaio de penetração tem como objectivo medir a penetração, em décimos de milímetro, que uma agulha de comprimento igual a 50,8 mm e diâmetro entre 1,0 e 1,02 milímetros penetra verticalmente na amostra de betume colocada em recipiente cilíndrico, por cinco segundos à temperatura padrão de 25°. O conjunto de penetração (agulha, peso de 50g e haste) deve ter uma carga total de 100g. A consistência do betume é inversamente proporcional à penetração da agulha, ou seja, quanto mais altos os valores de penetração obtidos, menos consistentes são os betumes.



Figura 2.5 – Ensaio de Penetração (Filho 2009)

2.3.3.2 Ensaio Temperatura de Amolecimento

Outro ensaio convencional muito utilizado para medir a consistência de um betume é o método de anel e bola. Este ensaio é usado para determinar a consistência de um betume na medida em que mede a temperatura aproximada em que o comportamento do betume transita de um sólido para um líquido. Esta temperatura é determinada quando a esfera de aço, padronizada, alonga um anel cheio com betume, percorrendo uma distância de 25,4 mm. Quanto maior o valor desta temperatura, maior será a consistência do betume à temperatura ambiente.



Figura 2.6 – Ensaio Temperatura de Amolecimento (Filho 2009)

2.3.3.3 Ensaio de Viscosidade Cinemática 135°C

Existe ainda o ensaio de viscosidade aparente cinemática (ou aparente), que mede o estado de fluidez do betume a três temperaturas diferentes, superiores a 130°, especificadas pela norma. Este ensaio consiste em medir o tempo, em segundos, que uma amostra de betume demora a escoar por um orifício, vindo a encher um frasco receptor, até a marca de 60 ml, depositado na parte inferior do viscosímetro. O tempo registado é o valor da viscosidade.



Figura 2.7 – Ensaio Viscosidade Cinemática 135° (Filho 2009)

2.4 Formulação

As misturas betuminosas contêm essencialmente três componentes: agregados, betume e vazios. A formulação de uma mistura betuminosa consiste na selecção e estabelecimento das dosagens destes seus principais constituintes, de modo a encontrar um material económico que garanta um desempenho óptimo em serviço. E para que as misturas cumpram adequadamente a sua função é essencial que se assegure uma boa qualidade ao nível do seu fabrico. A formulação das misturas é fundamental na medida em que a fórmula para execução seleccionada condicionará as características mecânicas da mistura.

No que diz respeito ao modo como são apuradas as percentagens ideais para um melhor funcionamento da mistura, estas podem-se dividir em misturas formuladas a quente ou a frio.

No caso das misturas betuminosas denominadas correntemente por “misturas a frio”, o ligante empregue no fabrico da mistura betuminosa é uma emulsão betuminosa. Assim, enquanto que no caso das misturas betuminosas a quente, o processo utilizado para se obter um material com a viscosidade adequada ao fabrico, espalhamento e compactação da mistura betuminosa, é o aquecimento do betume e consequentemente dos agregados, a altas temperaturas, no caso das misturas betuminosas a frio, a redução da viscosidade do betume (que à temperatura ambiente é praticamente sólido), é conseguida emulsionando-o com água, ou seja, fabricando emulsões betuminosas.

Os métodos de formulação a quente de misturas betuminosas mais utilizados são empíricos, ou seja, servem para estabelecer “receitas” de misturas com base na experiência acumulada ao longo dos anos na utilização de materiais betuminosos que, obedecendo a determinadas exigências, mostraram ter um comportamento satisfatório “*in situ*”. A previsão das propriedades das misturas é feita com base no relacionamento entre os resultados de ensaios laboratoriais usados para a formulação e o desempenho das misturas em serviço. Além do método de Marshall, o mais conhecido, integram este grupo, o método de Duriez e o método de Hveem, entre outros. A larga experiência resultante do uso destes métodos ao longo de décadas, como ainda é o caso do método de Marshall em Portugal, permite estimar razoavelmente o

comportamento das misturas em função da sua composição e dos parâmetros de ensaio. No entanto, os métodos empíricos não permitem medir directamente as propriedades mecânicas fundamentais e incorporam procedimentos desajustados a inovações tecnológicas e a novos materiais de pavimentação rodoviária.

Existem também os chamados métodos analíticos/rationais. Os métodos analíticos permitem chegar à composição volumétrica das misturas betuminosas de forma puramente analítica, não sendo para o efeito necessários quaisquer provetes. Além da obtenção da proporção de cada um dos agregados seleccionados, do ligante e de vazios na mistura, regra geral, estes métodos incluem modelos de previsão do desempenho mecânico das misturas. Estes métodos não garantem totalmente o bom desempenho das misturas, pelo que, regra geral, são realizados ensaios de caracterização mecânica ou outros que permitem efectivamente concluir sobre a qualidade das misturas e, assim, validar a fórmula para execução obtida de forma matemática.

2.4.1 Método Marshall

O método Marshall é provalvemente o método de formulação de misturas mais usado em Portugal e em todo o mundo, apesar de algumas limitações que lhe são reconhecidas. Os conceitos básicos que suportam o método de Marshall foram estabelecidos por Bruce Marshall, técnico do Departamento de Estradas do Estado do Mississípi nos Estados Unidos da América. Em 1948, o método, tal como hoje é conhecido foi sujeito a melhoramentos com base em intensa investigação.

O método de Marshall aplica-se à formulação de misturas betuminosas a quente, densas ou abertas, desde que a dimensão máxima do agregado não seja superior a 25,4 mm (IGPAI 1968). Poderá ser utilizado tanto na formulação laboratorial de misturas como no seu controlo em obra. O Asphalt Institute (Asphalt Institute 1983) propõe a realização de cinco conjuntos de três provetes, fazendo variar de 0,5% a percentagem de betume (relativamente à massa total) entre cada uma das séries de amostras ensaiadas. Deve tentar-se que, pelo menos, dois dos conjuntos apresentem teores em betume acima do “ótimo” e que, pelo menos, dois dos restantes tenham teores abaixo desse valor.

Os agregados (secos na estufa até peso constante) são misturados com o betume de modo a que possa haver um correcto envolvimento dos primeiros pelo ligante. A temperatura a usar durante a preparação dos provetes não é normalmente fixada à partida porque o seu valor depende do tipo de betume a usar. O que interessa realmente controlar é a viscosidade do betume que, por variar com a temperatura, vai condicionar as temperaturas de mistura e compactação das misturas. De qualquer modo como indicação, e segundo a norma portuguesa NP-142 (IGPAI 1968), o betume deve ser aquecido a uma temperatura compreendida entre 120° C e 140° C, propondo-se a rejeição da amostra caso a temperatura de mistura esteja abaixo de 110° C, imediatamente antes da operação de compactação. Para o aquecimento dos agregados indica temperaturas entre 175°C e 190°C.

Colocado o material dentro do molde metálico, procede-se à sua compactação com um martelo normalizado que aplica sobre cada um dos topos do provete 35, 50 ou 75 pancadas em cada extremidade do provete (segundo o Asphalt Institute (Asphalt Institute 1983)), respectivamente no caso do tráfego estimado ser leve, médio ou pesado. Os provetes resultantes são cilíndricos com 101,6 mm de diâmetro e 63,4 mm de altura, sendo admitida alguma tolerância.

O método consiste na determinação, a partir de ensaios realizados sobre os provetes, de várias grandezas que caracterizam a mistura betuminosa a estudar. As principais são: a força de rotura (estabilidade), a deformação, a densidade aparente, a porosidade e o volume de vazios no agregado compactado – VMA.

Antes da realização dos ensaios destrutivos que integram este método, todos os provetes são pesados para posterior determinação da baridade aparente e a partir daqui e da estimativa da “baridade máxima teórica” determinar a porosidade e o grau de saturação em betume ou o VMA.

Finalmente, as restantes características são determinadas no ensaio de compressão Marshall: a força de rotura (estabilidade) e a deformação. A estabilidade de um provete é a força máxima a que este resiste, quando à temperatura de 60° C. A força é aplicada por uma prensa depois de colocado o provete entre duas meias canas de aço (estabilómetro Marshall), sendo este conjunto, por sua vez, colocado entre dois pratos da prensa. A velocidade de aproximação dos pratos é de 50,8 mm/min. A deformação, também medida, corresponde ao encurtamento diametral do provete ocorrido desde o início do ensaio até ao momento da rotura.

Para cada um dos provetes são portanto determinadas as seguintes características:

- baridade máxima teórica da mistura compactada;
- baridade da mistura compactada;
- porosidade;
- VMA – volume de vazios na mistura de agregados (ou grau de saturação em betume);
- estabilidade (ensaio de compressão);
- deformação (ensaio de compressão).

Os resultados de cada uma destas grandezas são as médias dos valores obtidos em cada um dos três provetes ensaiados (pelo menos), para cada teor em betume. Representam-se graficamente os valores encontrados, para cada uma das grandezas acima, em função da percentagem de betume. Em cada um dos cinco gráficos obtidos, traça-se a curva que melhor se ajusta aos pontos representados. A percentagem “óptima” de betume para a mistura estudada será a média das percentagens correspondentes à máxima estabilidade, à máxima baridade e ao valor médio dos limites da porosidade. O valor encontrado deverá corresponder a uma deformação, um VMA em betume dentro de certos limites impostos pelas especificações aplicáveis. Se os critérios pré-estabelecidos não forem atingidos será necessário produzir outra mistura que verifique todos os critérios.

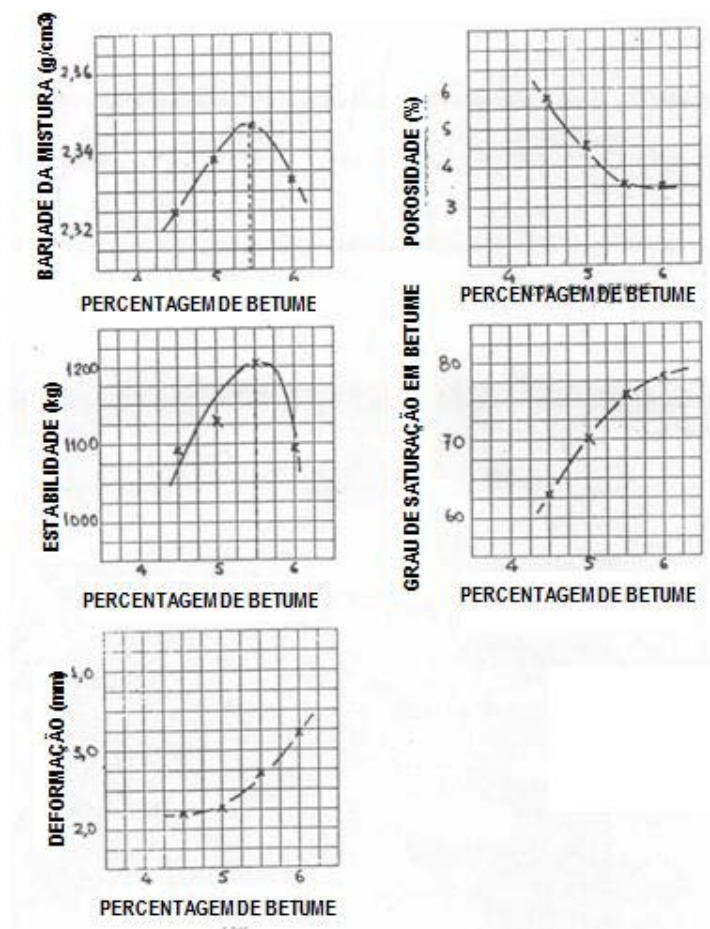


Figura 2.8 – Representação gráfica da variação das características de uma mistura betuminosa com a percentagem de betume com que foram fabricados provetes Marshall (Kraemer 1996)

2.4.2 Método CRR

O método CRR é um método analítico para a formulação de misturas betuminosas. As recomendações para a formulação de misturas betuminosas densas foram publicadas pelo Centre de Recherches Routières (C.R.R.), em 1961.

Em 1987 o C.R.R. publicou novas recomendações visando a sua aplicação a uma gama mais vasta de misturas e materiais que a do documento anterior e baseando-se nas recentes conclusões retiradas de ensaios laboratoriais e da experiência de colocação em obra.

Princípios Base

Os princípios de base das novas recomendações para formulação de misturas betuminosas densas são as seguintes:

- a) A composição das misturas deve ser determinada volumetricamente.
- b) De acordo com o seu esqueleto mineral as misturas podem ser divididas em três famílias:
 - misturas com esqueleto grosseiro em que a percentagem da fracção grosseira é muito elevada (pelo menos 70% do agregado em volume, neste caso as tensões induzidas pelo tráfego, são distribuídas pelos contactos entre as partículas grosseiras, dependendo a estabilidade da mistura da natureza e da qualidade dos contactos entre as partículas;
 - misturas com esqueleto de areia, cuja família pertencem aos betões betuminosos; da arrumação óptima da fracção areia e do seu atrito interno dependem fundamentalmente as características mecânicas da mistura. A fracção de areia mais grossa deve criar um volume de vazios suficientes para a incorporação nesse volume do mástique (fíler + betume). As recomendações do C.R.R. (CRR 1997) dizem respeito a esta família de misturas;
 - misturas com esqueleto de fíler, à base de misturas fíler betume, ou seja, o mástique.
- c) Devem ser tidos em conta os resultados dos ensaios laboratoriais para o estudo das propriedades mecânicas das misturas betuminosas, nomeadamente a sua resistência à fissuração por fadiga e às deformações permanentes. Relativamente à resistência à fissuração por fadiga foi concluído que esta é influenciada pelo mástique (qualidade, quantidade, e teor em betume) e pela porosidade da mistura compactada. Relativamente à resistência às deformações permanentes foi concluído que ela é influenciada pelo ligante (qualidade e quantidade) e pela composição da mistura (porosidade, angularidade das partículas, continuidade e preenchimento do esqueleto).
- d) É necessário procurar o equilíbrio entre a resistência à fadiga e a resistência às deformações permanentes. De facto, se do ponto de vista do ligante uma baixa susceptibilidade térmica da consistência é favorável para os dois tipos de fenómenos, já do ponto de vista da composição da mistura as suas exigências são

opostas. Uma baixa porosidade favorece uma boa resistência à fadiga mas pode ser prejudicial à resistência às deformações permanentes, ocorrendo a situação inversa para uma elevada porosidade.

- e) É necessário evitar um excesso de mástique (filer + betume) relativamente ao volume de vazios deixado pelo esqueleto mineral (areia + grossos) ao mesmo tempo que se deve evitar uma porosidade excessiva.
- f) Os princípios acima enunciados são a base do método analítico de formulação proposto pelo C.R.R. (CRR 1997). Segue-se uma etapa suplementar de verificação por meio de um ensaio de caracterização mecânica para o qual se procuram as seguintes características:
 - ser de execução simples
 - apresentar uma boa correlação com os ensaios laboratoriais mais fundamentais de flexão e compressão repetidas;
 - estar provido de critérios permitindo decidir do carácter satisfatório ou não da composição proposta
 - fornecer indicações que permitam guiar o utilizador nas medidas a tomar caso a mistura não satisfaça aos critérios mecânicos

O ensaio seleccionado foi o ensaio Marshall.

Descrição Geral do Método:

A metodologia de formulação apoia-se nos princípios de base atrás referidos e compreende as três seguintes etapas:

1ª etapa – Escolha dos materiais e sua caracterização, devendo permitir decidir o tipo de formulação mais adaptado, escolher os materiais constituintes da mistura grossos, areia, filer, ligante em função dos dados do projecto (especificações, caderno de encargos) e das disponibilidades do mercado e determinar as características dos materiais a utilizar como dados de entrada na formulação analítica.

2ª etapa – Formulação analítica, que tem como princípio de base o preenchimento do volume de vazios deixado pelo esqueleto mineral (grossos + areia) pelo mástique (filer + betume). Comporta inicialmente, o estudo e a determinação do volume de vazios no esqueleto mineral e a determinação da composição do mástique tendo em conta o poder rigidificador do filer. Segue-se o cálculo dos volumes e das massas dos vazios constituintes.

3ª etapa – Verificação experimental da composição da mistura determinada na 2ª etapa através de ensaio Marshall. Caso os resultados obtidos pelo ensaio de Marshall não satisfaçam os critérios estabelecidos há que modificar a composição da mistura. A interpretação dos resultados obtidos no ensaio Marshall permitirá decidir se é necessário modificar a composição determinada inicialmente, nomeadamente alterando a relação dos volumes grossos e areia, a composição do mástique ou o volume do mástique.

O método para a determinação do teor em ligante, atrás referido, assenta na consideração de que esse ligante é o mástique, ou seja, a mistura filer + betume. Na metodologia anteriormente proposta pelo C.R.R., em 1961, bem com, por exemplo, no método Duriez, o ligante é o betume e o seu teor é estabelecido com base na superfície específica dos agregados e na espessura da película necessária ao seu envolvimento com betume.

Os métodos de formulação com base em relações analíticas têm a sua base nos modelos de previsão que permitem estimar as características mecânicas e físicas de uma mistura a partir da sua composição.

2.4.3 Agregados

2.4.3.1 Generalidades

A utilização de agregados tem como função conferir à mistura betuminosa um esqueleto mineral, ou seja, uma estrutura que forneça a estabilidade à mistura. Isto pode ser alcançado através de melhores propriedades para os agregados (tamanho, forma, angularidade, textura e granulometria), considerando que a estrutura granular formada pelos agregados é directamente responsável pela resistência ao corte de uma mistura betuminosa, e consequentemente responsável por evitar deformações. Além disso, as características físicas, químicas e mecânicas dos agregados possuem estreita relação com a origem geológica e mineralógica da rocha que os originou.

A quantidade de material agregado que constitui as misturas betuminosas para pavimentação rodoviária é geralmente da ordem de 90% a 95% do seu peso, correspondendo a valores de 75 a 85% do seu volume e as suas características influenciam o desempenho das suas aplicações (Kandhal *et al.* 1997).

Os agregados podem classificar-se de vários modos, dependendo do ponto de vista que se considere. Contudo as classificações mais frequentes são relativas à natureza do agregado, ao seu tamanho e à distribuição dos grãos.

Conforme o modo como são obtidos podem classificar-se em naturais (rolados), quando constituídos de grãos oriundos da alteração das rochas pelos processos de intemperismo (seixos e areias) ou produzidos por processos de britagem (britas), ou artificiais, em que os grãos são produtos ou subprodutos de processo industrial por transformação física e química do material (escória de alto forno, argila expandida).

Quanto ao tamanho, os agregados são classificados da seguinte forma: agregado graúdo é o material retido no peneiro nº 10 (2,0 mm), britas, cascalhos e seixo; agregado miúdo é o material que passa no peneiro nº 10 (2,0 mm) e fica retido no peneiro nº 200 (0,075 mm), pó de pedra, areia; filer é o material que passa pelo menos 65% no peneiro nº 200 (0,075 mm), cal extinta, cimento Portland, pó de chaminé. Os agregados graúdos, miúdos e material de enchimento são não-plásticos e inertes em relação aos demais componentes de uma mistura de agregados.

A classificação dos agregados, em Portugal, quanto à dimensão das partículas é a seguinte: brita é o material cujo diâmetro equivalente é superior a 30 mm e inferior a 150 mm; murraça são as partículas de diâmetro equivalente compreendido entre 15 mm e 30 mm; gravilha corresponde ao material granular cujas partículas têm um valor de diâmetro equivalente entre 5 mm e 15 mm; agregado fino é o material cujo diâmetro equivalente é inferior ou igual a 5 mm; filer corresponde às parcelas das partículas que têm um diâmetro equivalente inferior a 0,07 mm.

Quanto à granulometria, os agregados são classificados da seguinte forma: granulometria densa aquela que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores; granulometria aberta aquela que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino, para preencher os vazios entre as partículas maiores; tipo macadame aquela que possui partículas de um único tamanho, ou seja, com uma granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é, aproximadamente, o dobro do diâmetro mínimo (LNEC 1969).

2.4.3.2 Filer

O termo de filer é geralmente aplicado para uma especial fracção dos agregados minerais, cuja maior parte (pelo menos 65%) passa pelo peneiro 200. Como um dos ingredientes numa mistura betuminosa, o filer desempenha um papel importante na determinação das propriedades e comportamento das misturas.

Atendendo à sua origem o filer pode denominar-se de recuperado, se for proveniente da extracção das poeiras que juntamente com o ar e o vapor de água resultam do processo de secagem e aquecimento dos agregados durante o fabrico das misturas betuminosas nas centrais de produção destas, ou comercial, que pode ser constituído por pó de calcário, cimento Portland, ou cal hidráulica devidamente apagada.

A interacção filer/betume é um importante factor de caracterização do filer e dos seus efeitos no comportamento das misturas betuminosas. Esta interacção depende da composição química do betume e também principalmente de características do filer como a composição mineralógica, textura superficial e superfície específica (Motta & Leite 2000). O filer actua conjuntamente com o ligante betuminoso formando um “mástique” que liga as restantes partículas de agregados presentes na mistura betuminosa, ajudando a diminuir a fendilhação destas.

A presença do filer aumenta o módulo de elasticidade das misturas betuminosas, tornando-as mais rígidas, aumentando assim a sua resistência à deformação permanente. Mas se o efeito ensurdecador do filer nas misturas betuminosas for excessivo, pode ter como consequência uma fendilhação precoce das camadas betuminosas. Quando a percentagem de material que passa no peneiro 200 aumenta, reduz-se os vazios no esqueleto mineral, melhora-se a granulometria, e a trabalhabilidade da mistura betuminosas aumenta até certo ponto. Acima deste nível quanto maior for a percentagem de filer, a estabilidade do esqueleto mineral começa a ser comprometida pois os contactos entre as partículas grossas começam a diminuir, piorando assim a capacidade de compactação da mistura (Motta & Leite 2000).

Ou seja, nas devidas proporções o filer pode trazer grandes benefícios para a mistura como maior compacidade, maior ligação química, maior módulo de elasticidade, mas em quantidades excessivas pode provocar uma menor estabilidade dimensional, provocando assim uma maior susceptibilidade à deformação.

3 COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO

3.1 Reologia

3.1.1 Definição de Reologia

O betume é um termoplástico viscoelástico que se comporta como um sólido elástico para temperaturas baixas e/ou tempos de carga reduzidos (elevadas frequências) e comporta-se como um fluido viscoso para temperaturas elevadas e longos tempos de carga (baixas frequências). A resposta do betume à tensão aplicada é então dependente da temperatura e do tempo de carga aplicado e consequentemente a reologia do betume é definida através da resposta tensão-deformação-tempo-temperatura.

Na medição das propriedades físicas do betume, é importante em primeiro lugar caracterizar a reologia do betume. Reologia é uma ciência interdisciplinar que está relacionada com o estudo da resposta interna dos materiais à tensão aplicada. A palavra *reologia* traduzida da língua grega significa “o estudo do fluxo” (Eurobitume 1996). A reologia do betume pode contudo, de uma forma geral, ser definida como o conjunto de registos fundamentais relacionados com o fluxo e as características da deformação do betume.

O módulo de elasticidade do betume é dependente do tempo, o que significa que varia em função do tempo de carga. As propriedades de materiais reológicos são também dependentes da temperatura. Quer a relação com a temperatura, quer a relação com o tempo de cargas têm de ser caracterizadas quando se analisam as propriedades reológicas de materiais como o betume.

3.1.2 Comportamento Viscoelástico do Betume

O betume é um material termoplástico que se comporta com um material viscoelástico. A expressão acima mencionada de “comportamento viscoelástico” está relacionada com as propriedades mecânicas do betume que, nos dois limites extremos, pode resultar num comportamento do betume como um sólido elástico ou como um fluido viscoso, dependendo da temperatura e do tempo de carregamento. Para baixas temperaturas, as propriedades elásticas dominam, enquanto que para as altas temperaturas o betume comporta-se como um líquido, usualmente com propriedades viscosas de escoamento. Para as temperaturas “normais” de pavimento o betume tem uma mistura de propriedades sólidas com viscosas (Dukatz & Anderson 1980). Para estas temperaturas o betume exhibe simultaneamente comportamento elástico e viscoso e tem para as suas funções não uma resposta instantânea para os tempos de carga, mas uma resposta que depende do tempo (Goodrich 1988). Os intervalos de valores de temperatura e de tempo de carregamento a que o comportamento viscoelástico ocorre é indicativo das típicas condições experimentadas em serviço.

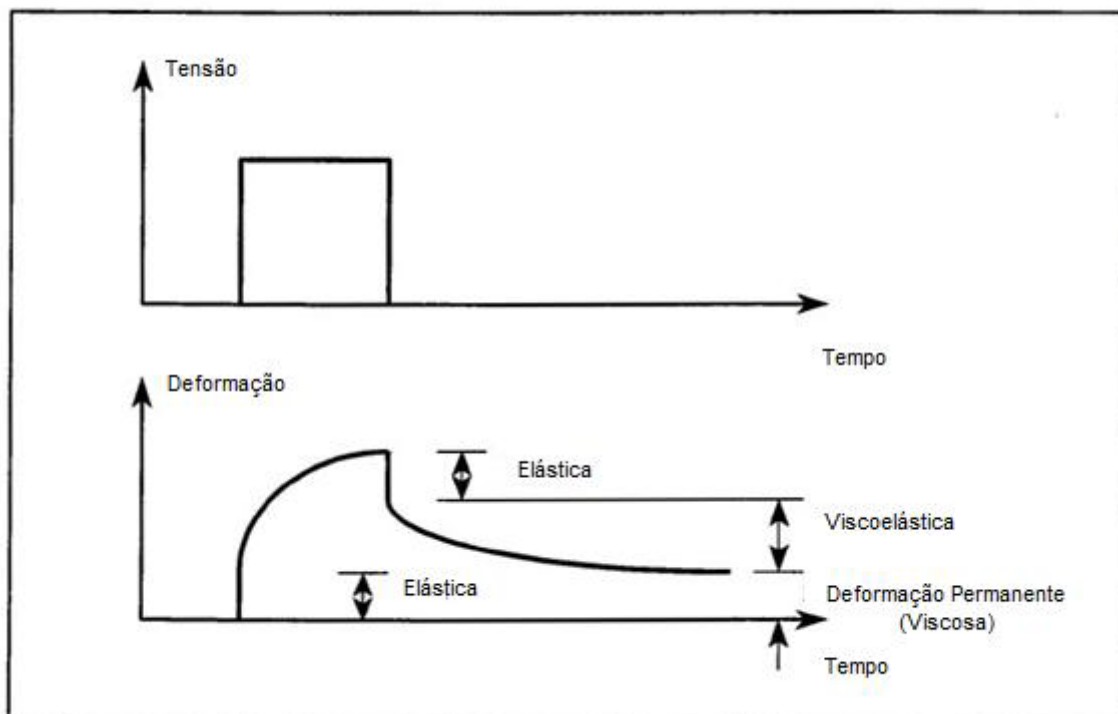


Figura 3.1 – Resposta viscoelástica para uma carga aplicada (Airey 1997)

A componente viscosa é apenas responsável pela deformação não recuperável que sucede quando o betume é carregado. Existe sempre uma deformação residual após cada carregamento. Já a componente elástica é responsável pela recuperação da deformação sofrida voltando à mesma forma que tinha antes do carregamento.

A resposta elástica do betume é dominante para tempos de carga curtos e/ou temperaturas baixas, por oposição à resposta viscosa que domina para tempos de carga de maior duração e/ou temperaturas elevadas. Uma resposta elástica com algum atraso relativamente ao carregamento é característica de carregamentos e/ou temperaturas intermédias. A componente viscosa, bem como a componente elástica com atraso na deformação são dependentes do tempo, uma vez que não respondem de imediato às cargas actantes. Apesar de nenhuma da deformação viscosa ser recuperada, assim que a carga é removida, a deformação da componente elástica com atraso é recuperada, mas não de imediato como na deformação da componente elástica pura.

As descrições dadas sobre respostas elásticas, viscosas e viscoelásticas são para uma resposta linear, no sentido que a deformação para qualquer valor de temperatura e de duração de carregamento é directamente proporcional à carga aplicada. Uma resposta não-linear, especialmente para materiais viscoelásticos, é extremamente difícil de caracterizar em laboratório ou de modelar em aplicações práticas de engenharia (Anderson *et al.* 1994). Felizmente, os métodos lineares de caracterização e análise são de uma forma geral mais do que suficientes para resolver os problemas dos engenheiros. Para garantir que o betume tem um comportamento que se possa aproximar do comportamento linear há que ser assegurado que a tensão ou a deformação aplicada ao betume permanece dentro de certos limites (Van der Poel 1954).

O comportamento linear é característico não só de temperaturas baixas e de tempos de carregamentos curtos (altas frequências), onde o material se comporta como um sólido elástico, mas também é característico para temperaturas elevadas e para longos períodos de carga (baixas frequências) onde o material tem um comportamento que se assemelha a um fluído de Newton. A gama de valores onde o comportamento não linear tem uma maior manifestação é para valores de temperatura e de carregamento intermédios (Van der Poel 1954). São justamente este tipo de valores que mais ocorrem em serviço.

A resposta linear viscoelástica do betume, e, portanto, a forma da sua curva mestra pode, de uma forma generalizada, ser separada em três zonas/regiões de comportamento:

- Para temperaturas baixas ou curtos períodos de carregamento (frequências elevadas), o betume tem um comportamento de um sólido. O módulo de elasticidade tende para um valor limite de aproximadamente 1 GPa aquando do carregamento e 3 GPa para tensão compressão ou flexão.
- Para temperaturas ou tempos de carregamento intermédios, o betume experimenta um conjunto de comportamentos que vão variar entre o sólido e o viscoso. A transição é caracterizada por um grande atraso elástico. O módulo de elasticidade tem uma grande variação em função da temperatura e/ou tempo de carregamento.
- Para temperaturas elevadas ou tempos de carregamento longos, o betume comporta-se como um fluido viscoso. A variação do módulo de elasticidade tende a ser constante e a variar linearmente em função do tempo de carga.

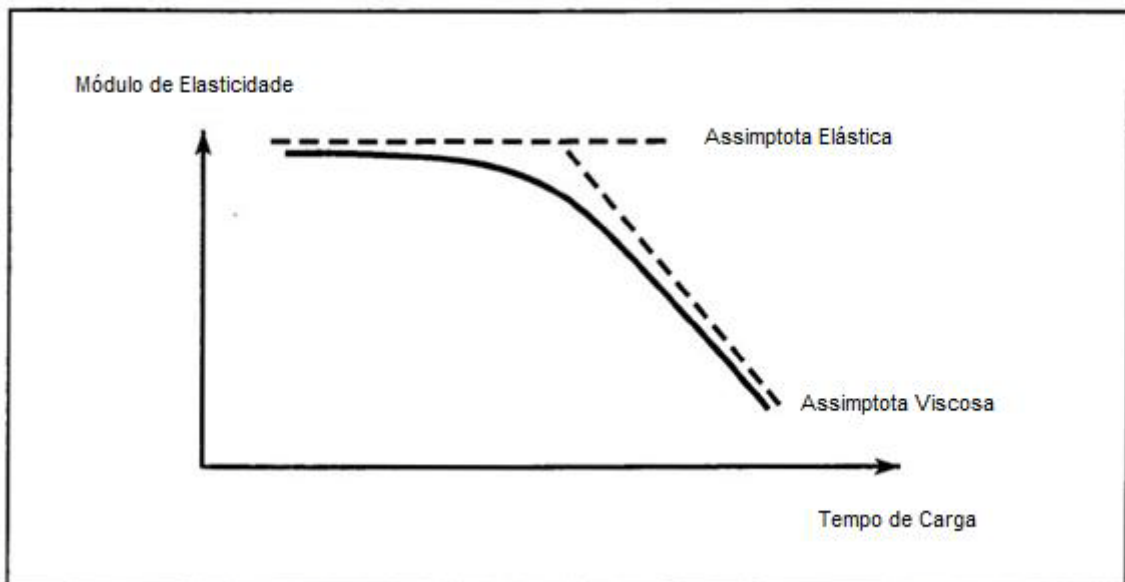


Figura 3.2 – Resposta viscoelástica para uma carga aplicada (Airey 1997)

3.1.3 Modelos Reológicos

Uma mistura betuminosa é um material heterogéneo, no sentido em que se distinguem à vista desarmada os seus constituintes. No entanto, é comum estudar a mistura betuminosa como se fosse um meio contínuo e assim utilizar princípios da mecânica dos corpos deformáveis, como são os conceitos de tensão e extensão, para a análise do seu comportamento. São utilizados modelos reológicos para relacionar as tensões com as extensões.

São vários os modelos reológicos que permitem estudar o comportamento dos diferentes materiais. Estes permitem simular o comportamento de determinado material quando solicitado, isto é, tensão-extensão. Em seguida irá ser feito um resumo de alguns dos principais modelos usualmente utilizados para a modelação de misturas betuminosas, para se tentar perceber-se um pouco melhor o comportamento destas misturas.

Os tipos de comportamentos mais simples, e que servem de base para todos os modelos mais complexos, são o comportamento elástico e o comportamento viscoso. Porém as misturas complexas não podem ser representadas por modelos com tão pouca complexidade. São representadas por modelos mais complexo cuja formação é obtida a partir de modelos mais simples.

- Modelo de Hooke

Um dos comportamentos mais simples é o comportamento elástico que pode ser representado por uma mola. Aplicando uma força à mola, esta irá sofrer uma determinada deformação até ao momento em que se deixa de aplicar a força, voltando a mola à sua configuração inicial.

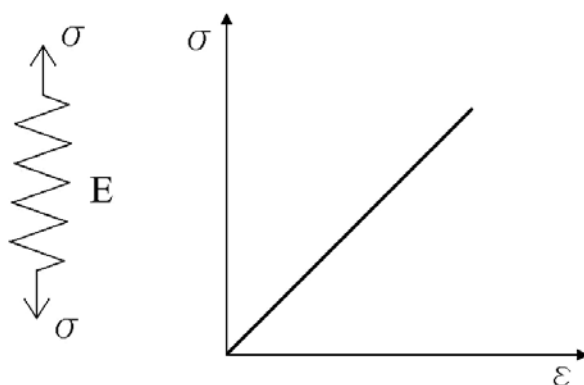


Figura 3.3 – Mola com comportamento elástico linear (Gardete 2006)

Considera-se habitualmente que a mola apresenta uma extensão proporcional à tensão, ou seja, um comportamento elástico-linear, pese embora o facto de as molas poderem apresentar comportamentos não lineares. Assim, a expressão que relaciona as tensões e deformações é a lei de Hooke, que é traduzida pela equação:

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

Em que E é o módulo de elasticidade, que traduz a proporcionalidade entre a tensão e a extensão.

- Modelo de Newton

Outro tipo de comportamento mais simples é o comportamento viscoso, sendo este modelo habitualmente representado por um amortecedor. Este é constituído por um cilindro que contém um líquido, dentro do qual move-se um êmbolo com um orifício. Quando se aplica uma força no êmbolo o líquido passa através do orifício com um caudal que depende da pressão no líquido, que está relacionada com a força aplicada. Assim, o êmbolo irá mover-se com uma velocidade que depende da pressão no líquido, isto é, quanto maior a pressão maior será a velocidade do êmbolo.

A velocidade de deslocamento do êmbolo no tempo $\partial\varepsilon/\partial t$, é directamente proporcional à tensão exercida, sendo a constante que as relaciona a viscosidade do líquido, η .

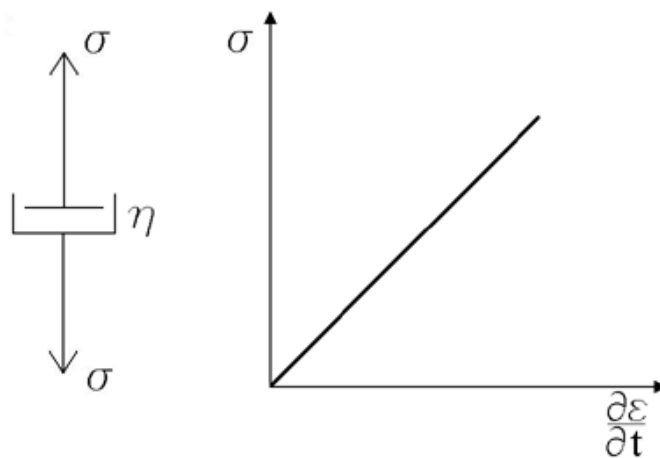


Figura 3.4 – Amortecedor com comportamento viscoso, de acordo com a lei de Newton (Gardete 2006)

O amortecedor segue assim a lei de Newton, existindo uma proporcionalidade entre a tensão e a variação de extensão no tempo, caracterizada pela viscosidade do líquido. A lei de Newton pode assim ser traduzida pela equação:

$$\sigma = \eta \times \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t}$$

Os parâmetros módulo de elasticidade E e viscosidade η são os parâmetros necessários para definir respectivamente o comportamento elástico e o comportamento viscoso.

No entanto, como foi referido para caracterizar comportamentos mais complexos não são suficientes estes modelos físicos simples. É assim necessário recorrer a modelos mais complexos, que podem ser associações de modelos simples.

- Modelo de Maxwell

Aumentando a complexidade dos modelos mais simples temos um dos modelos utilizados para representar um comportamento viscoelástico: modelo de Maxwell (Huang 1993), que corresponde à associação em série de uma mola com um amortecedor.

Aplicando uma tensão constante durante um intervalo de tempo $t_1 - t_0$, a extensão total, que é a soma das extensões da mola e do amortecedor, é dada pela equação:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} \times (t_1 - t_0)$$

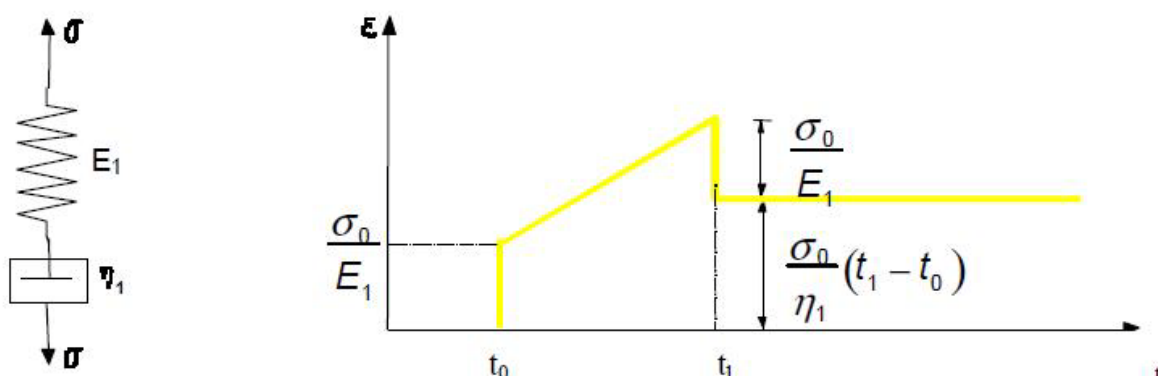


Figura 3.5 – Modelo de Maxwell para representação do comportamento viscoelástico (Freire 2002)

Quando uma tensão σ_0 é aplicada ao sistema de forma instantânea, a mola sofre uma extensão também instantânea de σ_0 / E_1 , justificada pela resposta imediata da mola. Se a extensão se mantiver constante, a tensão vai diminuir devido à acção do amortecedor até atingir o valor zero após um determinado período de tempo. Se a tensão se mantiver constante, como é o caso, a extensão vai aumentando com o tempo devido ao amortecedor.

- Modelo de Kelvin

Como outra opção para aumento de complexidade da caracterização de comportamentos viscoelásticos a partir dos modelos de base surge o modelo de Kelvin. Este modelo consiste na associação em paralelo de uma mola e um amortecedor.

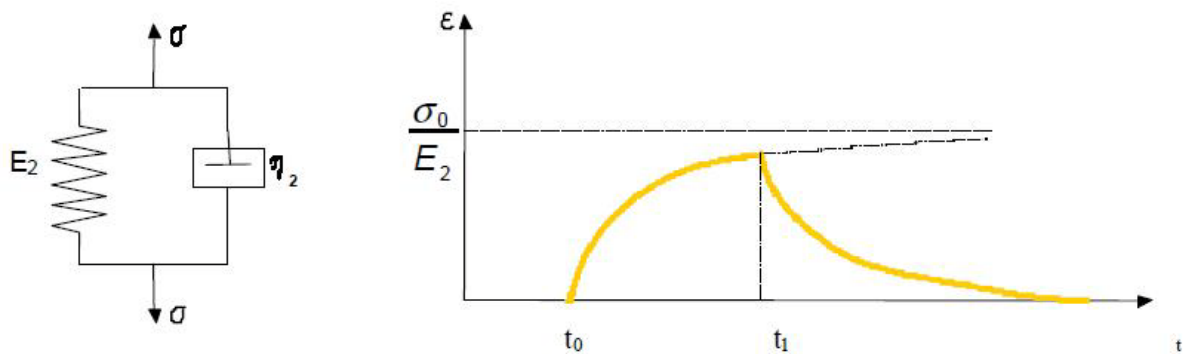


Figura 3.6 – Modelo de Kelvin para representação do comportamento viscoelástico (Freire 2002)

Neste modelo, ao ser aplicada uma tensão, a mola e o amortecedor apresentam a mesma extensão, pois estão associados em paralelo, sendo a tensão aplicada igual à soma das tensões da mola e do amortecedor, ou seja:

$$\sigma = E_2 \times \varepsilon + \eta_2 \times \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t}$$

Para uma tensão constante, pode determinar-se a extensão obtendo-se:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_2} \times \left[1 - e^{\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)} \right]$$

Em que $T_2 = \eta_2/E_2$, é o tempo de atraso. O tempo de atraso é justificado pelo facto da mola não estar livre para sofrer extensões, sendo também esta a justificação para não existir uma extensão imediata.

- Modelo de Burgers

Um dos modelos mais utilizados para caracterizar o comportamento viscoelástico é o modelo de Burgers (Huang 1993). Este modelo é ainda mais complexo que os anteriores pois resulta na associação em série dos modelos de Maxwell e de Kelvin. Como este é o modelo de modelação do comportamento de misturas betuminosas utilizado na elaboração do programa DEFPERM, será analisado com mais pormenor.

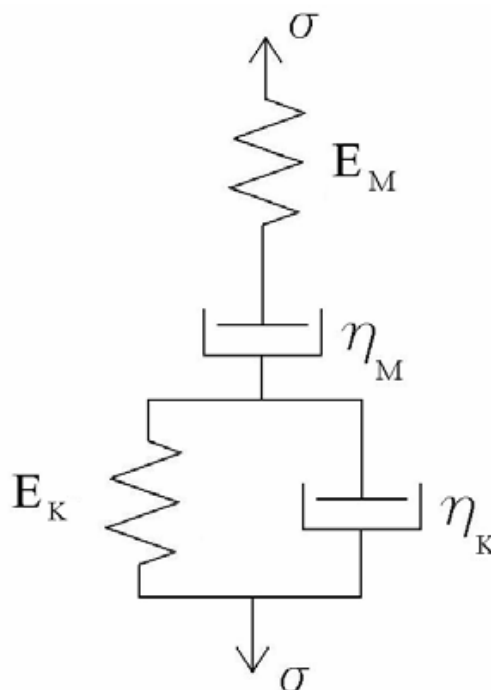


Figura 3.7 – Modelo de Burgers para representação do comportamento viscoelástico (Gardete 2006)

A figura 3.8 mostra como as tensões e as extensões se relacionam segundo o modelo de Burgers quando solicitado por um carregamento com tensão constante durante um determinado período de tempo $t_1 - t_0$.

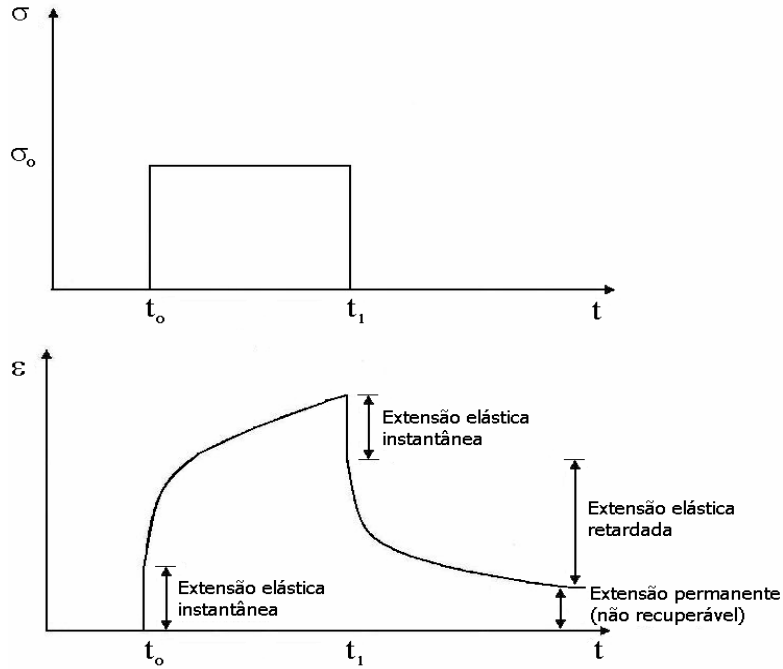


Figura 3.8 – Resposta do modelo de Burgers quando sujeito a um carregamento com tensão constante durante um determinado período de tempo (Gardete 2006)

Quando submetido a um tensão constante (σ_0), e durante o carregamento ($t_0 \leq t \leq t_1$) a extensão do modelo de Burgers pode ser traduzida pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0}{\eta_M} \times (t - t_0) + \frac{\sigma_0}{E_K} \times \left[1 - e^{\left(\frac{E_K}{\eta_K} \times (t - t_0)\right)} \right]$$

A extensão total é assim composta por três parcelas, uma extensão elástica instantânea (caracterizada por E_M), uma extensão viscosa (caracterizada por η_M) e uma extensão elástica com atraso (caracterizada por E_K e η_K).

Após ser retirada a carga ($t > t_1$) verifica-se uma recuperação da extensão pela mistura betuminosa. No modelo de Burgers a extensão na descarga é dada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta_M} \times (t_1 - t_0) + \frac{\sigma_0}{E_K} \times e^{\left(-\frac{E_K}{\eta_K} \times (t - t_0)\right)} \times \left[1 - e^{\left(\frac{E_K}{\eta_K} \times (t - t_0)\right)} \right]$$

Assim, quando $t \rightarrow \infty$ a extensão tende para:

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_0}{\eta_M} \times (t_1 - t_0)$$

Esta expressão representa a extensão não recuperável ou extensão permanente. Por cada carregamento existirá uma parcela de extensão irrecuperável, é precisamente o acumular destas extensões viscosas que origina a deformação permanente nas misturas betuminosas.

Traduzindo estas extensões de forma gráfica obtém-se a curva da figura 3.9, onde se representa a relação entre as equações do modelo de Burgers (Gardete 2006).

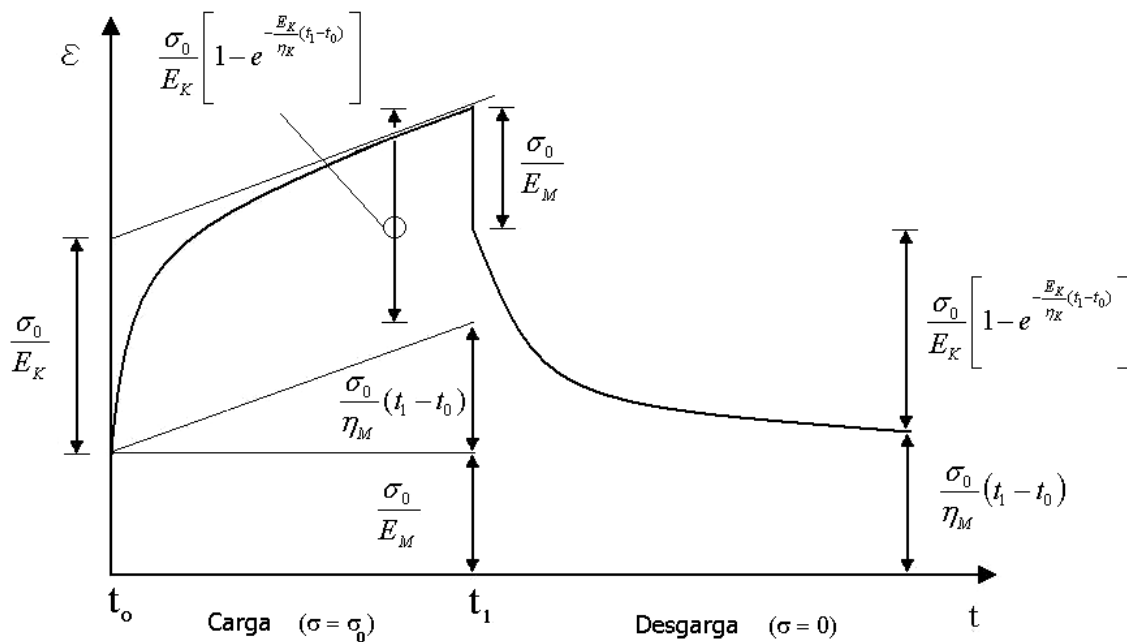


Figura 3.9 – Representação das diferentes componentes da deformação de misturas betuminosas e a sua tradução no modelo de Burgers (Gardete 2006)

3.1.4 Carga Dinâmica

Uma forma de estudar a reologia de um betume é recorrendo a uma análise dinâmica. Um exemplo deste tipo de análise consiste em utilizar um oscilador padrão, que permite caracterizar vários tipos de betume para determinadas gamas de valores de tempo e de temperatura (Anderson *et al.* 1994; Goodrich 1988; Petersen *et al.* 1994).

Durante esta análise, uma amostra de betume é colocada entre dois discos, ou pratos, paralelos e é sujeita a cargas ou deformações alternadas. O ensaio pode ser controlado através de valores de tensão, em que é esta grandeza que é manipulada sendo a deformação a variável dependente, ou através de valores de deformação, em que a tensão vai variar até atingir os valores de extensão pretendidos. Em termos gerais, este tipo de ensaio é usualmente realizado através do controlo da deformação (Goodrich 1988; Pink *et al.* 1980), o que garante valores seguros e dentro região viscoelástica linear.

Neste ensaio dinâmico, o material é sujeito a uma deformação sinusoidal, com uma velocidade angular ω (rad/s), representada pela seguinte expressão:

$$\gamma^* = \gamma_0 \times \sin \omega t$$

onde:

$$\gamma^* = \text{distorção angular}$$

$$\gamma_0 = \text{distorção angular máxima}$$

$$\omega = \text{velocidade angular (rad/s)}$$

A velocidade angular, ω , é dada pela seguinte expressão (Eurobitume 1996; Van der Poel 1954):

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

onde:

$$\omega = \text{velocidade angular (rad/s)}$$

$$f = \text{frequência, Hz}$$

A resposta à deformação aplicada é o desenvolvimento de uma tensão que, para uma viscosidade linear, é sinusoidal e atrasada relativamente à extensão. O valor desse atraso é dado pelo de ângulo de fase, δ . O valor da tensão é dado por:

$$\tau^* = \tau_0 \times \sin(\omega.t - \delta)$$

onde:

$$\tau^* = \text{tensão aplicada, Pa}$$

$$\tau_0 = \text{tensão máxima aplicada, Pa}$$

$$\delta = \text{ângulo de fase, em graus}$$

O ângulo de fase δ , é definido como o desfasamento/atraso da tensão aplicada com a extensão obtida. O ângulo de fase também pode ser designado por ângulo de perda e tem como símbolo alternativo ϕ . Para materiais com um comportamento elástico puro, o ângulo de fase será 0, por oposição aos materiais com comportamento viscoso que têm um ângulo de fase de 90° . O ângulo de fase é um parâmetro importante na descrição das propriedades de um betume.

A representação da deformação e da tensão devido à acção desta carga sinusoidal encontra-se na figura 3.10. O quociente entre a tensão e a deformação do betume define o módulo de corte complexo que é dado pela seguinte expressão:

$$G^*(\omega) = \frac{\tau^*}{\gamma^*}$$

onde:

$$G^*(\omega) = \text{Módulo de corte complexo, Pa, como uma função da velocidade angular, } \omega$$

e cujo valor máximo absoluto é dado pela relação entre a tensão máxima aplicada e a distorção angular máxima:

$$|G^*(\omega)| = \frac{\tau_0}{\gamma_0}$$

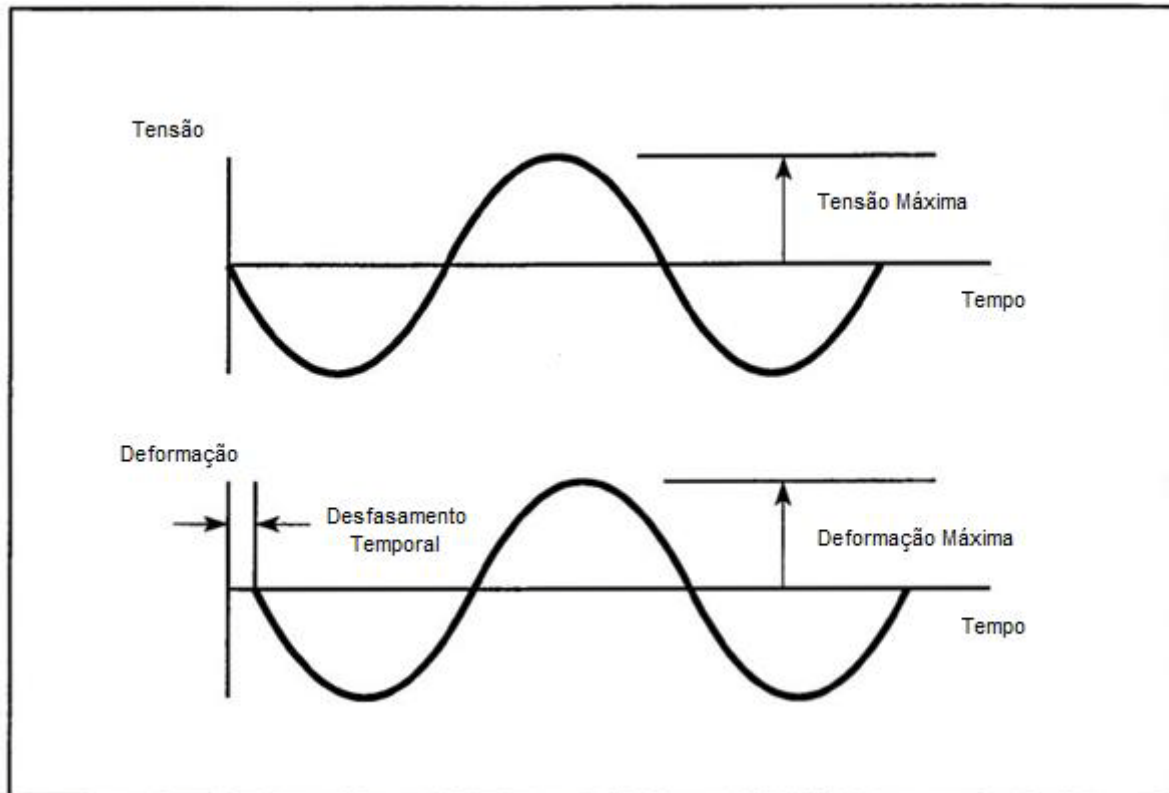


Figura 3.10 – Desfasamento no tempo entre os valores de tensão e de deformação (Airey 1997)

onde:

$G^*(\omega)$ = módulo de corte complexo, Pa

τ_0 = tensão máxima aplicada, Pa

γ_0 = distorção angular máxima

A norma do módulo de corte complexo é análoga à magnitude de um vector, logo, o seu valor é obtido através do valor das suas componentes:

$$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2}$$

O módulo de corte complexo também é correntemente denominado de módulo complexo ou módulo de corte.

O módulo de armazenamento, G' , está relacionado com a quantidade de energia que é guardada e libertada de forma elástica em cada oscilação. O módulo de armazenamento é obtido da seguinte forma:

$$G' = G^* \times \cos \delta$$

O módulo de perda, G'' , está relacionado com a energia que é dissipada na oscilação contínua do teste dinâmico. O módulo de perda é obtido da seguinte forma:

$$G'' = G^* \times \sin \delta$$

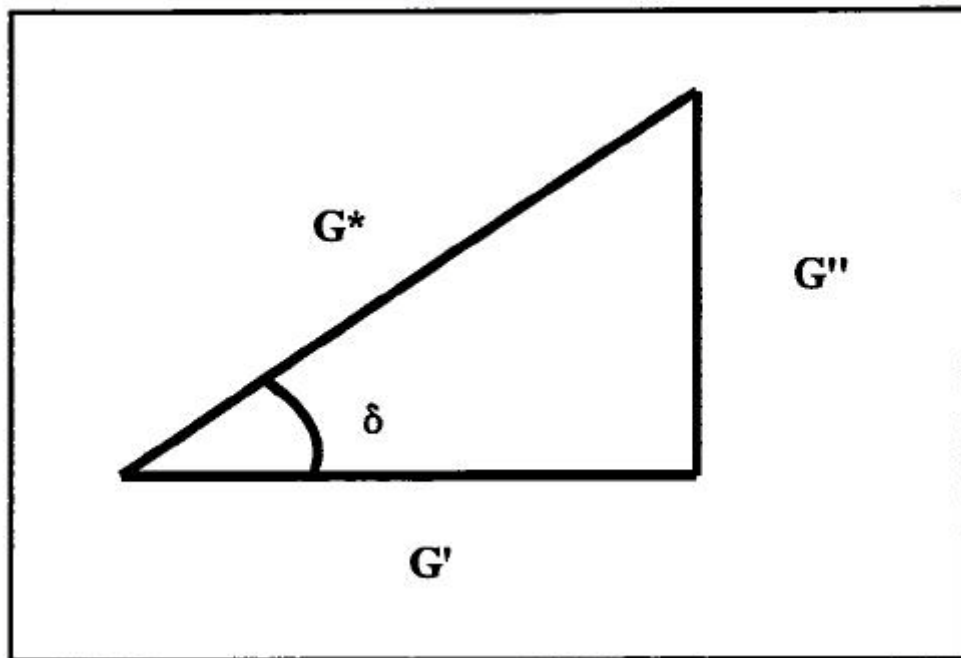


Figura 3.11 – Relação entre Módulo Complexo, Ângulo de Fase, Módulo de Armazenamento e Módulo de Perda (Airey 1997)

Para baixas temperaturas, ou tempos de carga reduzidos, o betume tem um comportamento próximo de um sólido ideal a tensão resultante reage de uma forma praticamente simultânea à deformação imposta (Goodrich 1988). Para temperaturas elevadas o betume tem um comportamento semelhante ao de um fluido onde a máxima tensão ocorre de forma completamente desfasada apresentando um valor de ângulo de fase praticamente de 90°.

O módulo de armazenamento e de perda, G' e G'' , são por vezes mal interpretados como o módulo elástico e viscoso respectivamente. Na realidade, a componente elástica da resposta apenas representa parte do módulo de armazenamento e a componente viscosa apenas representa parte do módulo de perda. Além disso, os materiais elásticos exibem uma quantidade significativa de resposta elástica com atraso que é dependente do tempo mas completamente recuperável. O módulo de armazenamento e o módulo de perda reflectem ambos uma parte da resposta elástica com atraso.

A tangente de perda é definida como o quociente entre a componente viscosa e a componente elástica do módulo complexo ou simplesmente a tangente do ângulo de fase.

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'}$$

Um valor da viscosidade do betume pode também ser obtido a partir do ensaio do oscilador dinâmico. Esta viscosidade é conhecida como a viscosidade complexa e é definida como a razão entre o módulo complexo e a frequência angular.

$$\eta^* = \frac{G^*}{\omega}$$

onde:

$$\eta^* = \text{viscosidade complexa, Pa.s}$$

A viscosidade complexa também pode ser denominada de viscosidade de corte dinâmica complexa.

Desde que a viscosidade complexa é uma função de um número complexo, uma parte real e uma parte imaginária também podem ser definidas.

A parte real da viscosidade complexa é denominada de viscosidade dinâmica e é definida como:

$$\eta' = \frac{G'}{\omega}$$

onde:

$$\eta' = \text{viscosidade dinâmica, Pa.s}$$

A parte imaginária da viscosidade complexa é chamada de componente fora de fase e é definida como:

$$\eta'' = \frac{G''}{\omega}$$

onde:

$$\eta'' = \text{componente fora de fase, Pa.s}$$

Os dois modos mais comuns de determinar a rigidez do betume são os ensaios de fluência, de carregamento constante, e os ensaios dinâmicos, alterando a tensão e a deformação mantendo a frequências e amplitudes constantes. Os reómetros de corte dinâmicos são usados para avaliar a viscosidade linear do betume no modo de carregamento sinusoidal. Podem ser feitas medições a diferentes temperaturas, frequências e níveis de deformação e tensão. Eles fornecem as únicas formas práticas de se obterem dados para tempos de carregamento inferiores a 1 segundo. Contudo, para intervalos de tempo de carregamento entre 1 a 100 segundos (Pink *et al.* 1980), estes instrumentos dinâmicos também fornecem dados que são equivalentes aos obtidos a partir de instrumentos transitórios como o reómetro de prato deslizante. Os dados dinâmicos podem ainda ser transformados, através de princípios de sobreposição, em dados de longos períodos de carregamento que são relevantes para o estudo das fracturas térmicas.

É importante que o intervalo de valores de deformação garanta que os ensaios dinâmicos são efectuados para condições viscoelásticas lineares para que os parâmetros do material, como G^* e η^* são independentes dos níveis de deformação aplicados.

3.1.5 Efeito Simultâneo Temperatura e Tempo

Existem várias formas de se representar o comportamento de um betume evidenciando os seus parâmetros: módulo de elasticidade e o ângulo de fase. Podem usar-se as curvas isotérmicas, as curvas isócronas, as curvas mestras, o diagrama de Black ou o diagrama de Cole-Cole. Em seguida irá ser feita referência somente às curvas mestras e ao diagrama de Black, uma vez que são os dois tipos de representações que melhor evidenciam a sobreposição tempo/temperatura.

- Curva Mestre

A curva mestra é obtida pela translação das curvas módulo de elasticidade/frequência (isotérmicas) de diversas temperaturas, para uma mesma curva, sendo a translação feita através da aplicação de um factor de escala $\log(\alpha_t)$. A transformação de escalas permite que as variáveis temperatura e frequência sejam combinadas numa nova variável “X” representada através da seguinte equação:

$$X = \log(\alpha_T \times F_r)$$

onde:

$$X = \text{factor de translação ou de escala}$$

$$\log(\alpha_T) = \text{factor de escala}$$

$$F_r = \text{frequência (Hz)}$$

Desta forma, a curva mestra é representada graficamente através da norma do módulo complexo $|E^*|$ e do factor de escala “X”, de modo que a relação frequência/temperatura é dependente do módulo de elasticidade para uma temperatura de referência fixada.

A curva mestra é construída através da aplicação do princípio da equivalência frequência/temperatura. A aplicação deste princípio refere-se a traçar o gráfico do módulo complexo (ordenadas) em função da frequência (abscissas), fazendo-se a translação de cada curva isotérmica de forma a obter-se uma curva contínua na escala logarítmica. A vantagem da aplicação deste procedimento é que uma vez que a curva mestra esteja estabelecida, é possível,

através de interpolação, obter o valor do módulo de rigidez para qualquer combinação de temperatura e frequência, dentro da abrangência das medidas (Partl & Francken 1998).

Considerando que a curva mestra caracteriza a viscoelasticidade do material, uma curva horizontal representa um mistura betuminosa com comportamento puramente elástico, enquanto que, uma curva vertical mostra o comportamento de uma mistura betuminosa susceptível às variações de temperatura e de frequência (Momm 1998).

O factor de translação, em geral, baseia-se em na seguinte equação:

$$\log(\alpha_T) = 0,4343 \times \frac{\delta H}{R} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right)$$

onde:

δH = energia de activação aparente característica do material (J/mol)

R = constante universal dos gases (8,31 J/mol/Kelvin)

T = temperatura (Kelvin)

T_R = temperatura de referência (Kelvin)

A translação das curvas isotérmicas pode ser feita, ainda, com a translação de cada uma das curvas isotérmicas de cada temperatura de modo a construir uma curva de equivalência frequência/temperatura contínua sobrepondo as frequências com módulos de mesmo valor, o que se denomina translação gráfica. Este princípio permite que os dados colectados a diferentes temperaturas sejam deslocados horizontalmente relativamente a uma temperatura de referência (Ferry 1980).

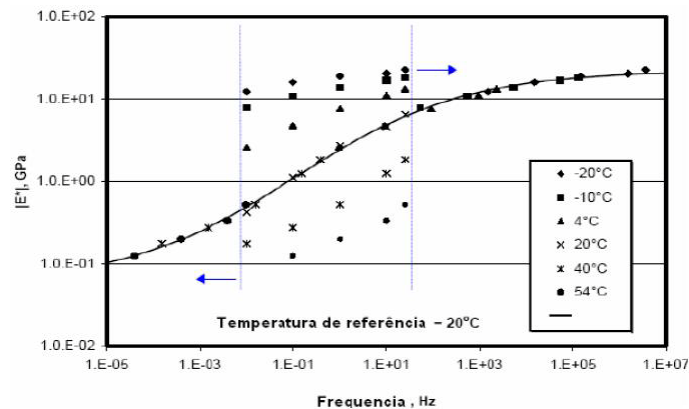


Figura 3.12 – Curva Mestra (Bernucci *et al.* 2007)

- Diagrama de Black

O diagrama de Black é representado através do gráfico do logaritmo da norma do módulo complexo (eixo das ordenadas) em função do ângulo de fase (eixo das abcissas). Se a sobreposição frequência/temperatura for perfeita, a curva obtida deve ser única. Isto é, para cada valor de desfasamento de ϕ corresponde um valor da norma de módulo na frequência considerada (Partl & Francken 1998).

Esta curva permite visualizar a zona dos módulos onde ocorre a redução de ângulo de fase para elevadas temperaturas (Baaj 2002). Como esta curva apresenta directamente a relação entre o módulo de elasticidade e o ângulo de fase, permite a obtenção da componente elástica do módulo de elasticidade. Esta característica é obtida por correlação linear entre o módulo e o ângulo de fase, correspondentes a temperaturas inferiores a 30°C (Pais 1999).

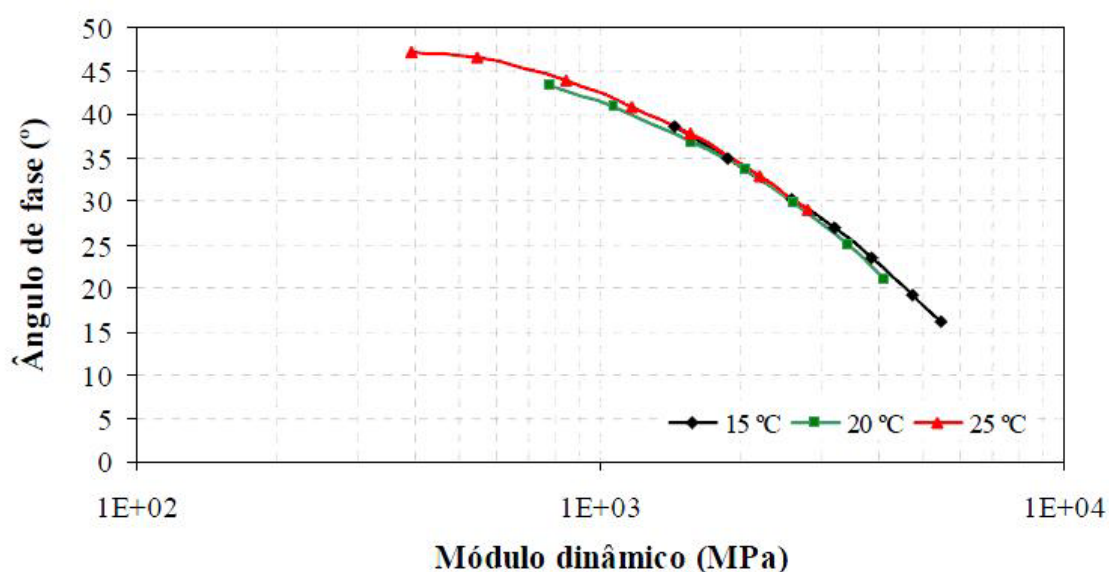


Figura 3.13 – Diagrama de Black (Bernucci *et al.* 2007)

3.2 Ensaaios

Existem um conjunto de ensaios destinados a melhor compreender este comportamento tão característico dos betumes. Dentro deste conjunto destacam-se os ensaios do viscosímetro rotativo, ensaio do reómetro de corte dinâmico, os ensaios de fluência e os ensaios de simulação.

3.2.1 Viscosímetro Rotativo

O viscosímetro rotativo é utilizado com o intuito de se determinar a viscosidade do betume a temperaturas elevadas, sendo geralmente consideradas elevadas acima dos 100 °C. O objectivo do ensaio é averiguar se o betume a temperaturas elevadas apresenta uma viscosidade adequada às operações de bombagem e de mistura permitindo o bom envolvimento dos agregados.

A viscosidade rotacional é determinada medindo o esforço de torção necessário para manter uma velocidade de rotação constante de uma lâmina cilíndrica quando submersa numa amostra de ligante betuminoso a uma temperatura constante (Asphalt Institute 1997). Normalmente a velocidade de rotação é de vinte rotações por minuto e a temperatura do ensaio é de 135° C.

O viscosímetro pode ser também utilizado para traçar gráficos de temperatura-viscosidade para se poder melhor estimar as temperaturas de mistura e de compactação a utilizar no fabrico e aplicação da mistura betuminosa.

De uma forma geral considera-se que o ensaio é positivo quando o resultado da viscosidade é superior a 3 Poise, podendo no entanto, em algumas situações, não ser respeitado este limite se ficarem garantidos, de outra forma, os objectivos deste ensaio que são a garantia de bombagem e manuseamento do betume.



Figura 3.14 – Viscosímetro rotativo (Teixeira 2000)

3.2.2 Reómetro de Corte Dinâmico

O reómetro de corte dinâmico é usado para medir as características reológicas do betume. É possível observar-se o princípio de funcionamento deste aparelho na figura 3.15, onde o betume é “ensanduichado” entre dois pratos, um fixo e o outro móvel. O prato que de cima, que pode ter também a forma de um cone, pode girar enquanto que o prato de baixo permanece fixo durante o teste. Ao longo do teste o prato de cima gira em torno do seu eixo fazendo o percurso partindo do ponto A para ponto B, mudando o sentido em B, voltando para o ponto A, fazendo percurso semelhante para o ponto C. Assim, realizando este movimento de forma suave, é completado um ciclo que pode ser continuamente repetido durante o teste. Normalmente este teste é realizado para um intervalo não só de frequências mas também de temperaturas.

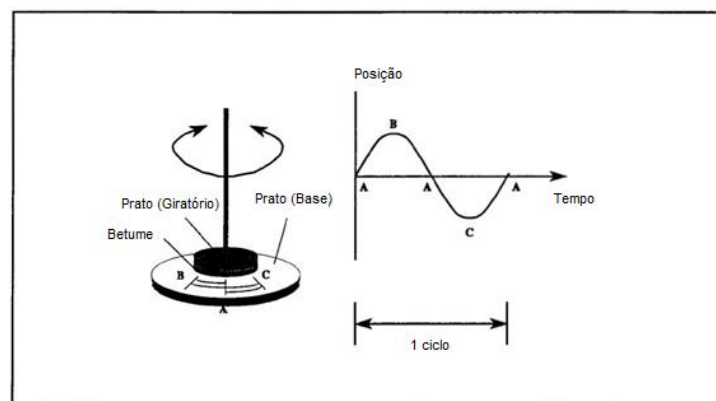


Figura 3.15 – Princípio de funcionamento do RCD (Airey 1997)

O ensaio do reómetro de corte dinâmico pode ser realizado através do controlo da tensão aplicada ao betume, ou da deformação a que este pode estar sujeito. Se o controlo é feito através da tensão, uma tensão de corte previamente definida é aplicada ao betume através da aplicação de uma rotação no prato de cima e é medida a amplitude deste movimento. Se for efectuado o controlo através da deformação, o prato de cima irá girar entre um intervalo de posições definido registando-se a tensão que foi gerada.

Seja qual for o modo de ensaio escolhido, o módulo de corte complexo, G^* é calculado como a razão entre a tensão tangencial, ou tensão de corte, e a deformação originada por esta tensão. O módulo de corte complexo, que prevê o valor da deformação quando o betume é sujeito a uma tensão de corte, é constituído por duas componentes: a componente elástica e a componente viscosa. Estas componentes são conhecidas como módulo de armazenamento, G' , e módulo de perda, G'' , respectivamente, e estão relacionadas não só ao módulo complexo, mas também entre si através do ângulo de fase δ . O ângulo de fase mede o atraso da deformação em relação à solicitação efectuada.

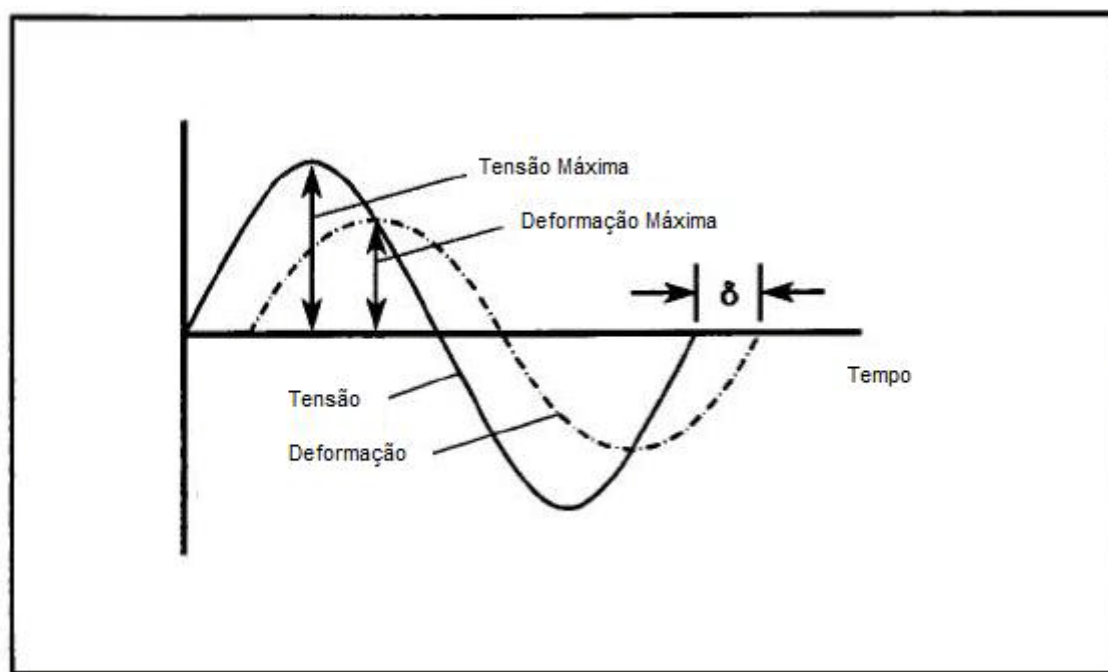


Figura 3.16 – Definições gráficas de grandezas associadas ao RCD (Airey 1997)

O modo como o ângulo de fase relaciona os diferentes módulos pode ser demonstrado pela figura 3.17. Os eixos do gráfico representam os comportamentos extremos que o betume pode apresentar. No eixo horizontal encontra-se o comportamento elástico, destinado a betumes que apresentem ângulo de fase nulo, e no eixo vertical encontra-se o comportamento viscoso, para os betumes que apresentem o máximo desfasamento possível. Para betumes com um comportamento intermédio, que misturem uma componente elástica uma componente viscosa, a representação será um vector de norma igual ao módulo de corte complexo cuja direcção faz um ângulo com a horizontal de valor igual δ , com a horizontal. Se um betume for ensaiado para baixas temperaturas e altas frequências irá apresentar um baixo valor δ , por oposição a altos valores de δ que são obtidos fazendo o ensaio a altas temperaturas e a baixas frequências.

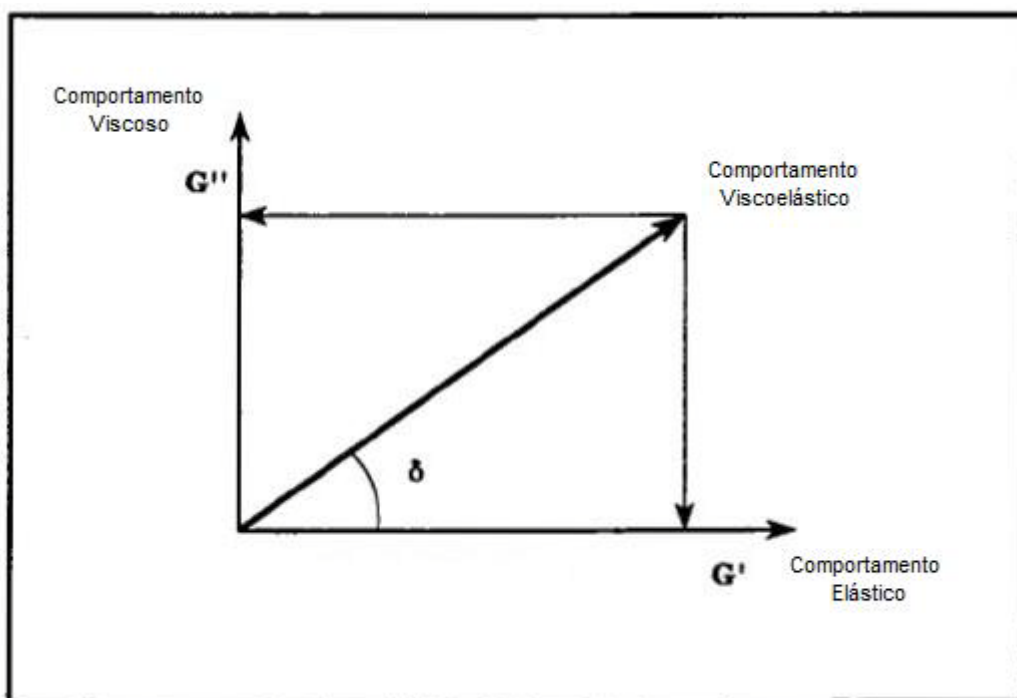


Figura 3.17 – Comportamento viscoelástico do betume (Airey 1997)

3.2.3 Ensaio de Fluência

Um material betuminoso comporta-se em muitas condições como um material viscoelástico. O grau de viscoelasticidade depende de entre outros factores do tempo de carga aplicada e da temperatura verificada no betume. Quando uma carga é aplicada num material e é mantida constante, o resultado da deformação é desenvolvido em duas fases: numa primeira fase independente do tempo em que ocorre uma deformação plástica e uma deformação elástica, e numa segunda fase dependente do tempo em que se manifesta a deformação elástica com atraso. Quando a carga é removida e é permitido ao material uma recuperação de forma, dá-se uma recuperação instantânea seguida de uma recuperação dependente do tempo (componente elástica com atraso). A recuperação não é total uma vez que parte da deformação é permanente.

A previsão do comportamento das camadas betuminosas sob o carregamento devido ao tráfego necessita do conhecimento da recuperação das misturas betuminosas utilizadas nessas camadas. Enquanto que a deformação independente do tempo de uma mistura betuminosa é da responsabilidade dos agregados e do betume, a deformação que depende do tempo está apenas relacionada com o betume. Um ensaio que permite perceber um pouco melhor a deformação do betume ao longo do tempo é o ensaio à compressão uniaxial de fluência.

O objectivo do ensaio à compressão uniaxial de fluência é avaliar a deformação permanente. O procedimento é realizado em duas fases: carregamento e descarregamento. Durante a fase de carregamento, aplica-se uma carga, de intensidade constante, por um determinado intervalo de tempo, geralmente uma hora. A segunda etapa consiste na fase de descarregamento, geralmente de duração inferior. A força aplicada é conhecida, as deformações são registadas, e posteriormente são possíveis de determinar diversos parâmetros da mistura como o módulo de elasticidade e o ângulo de fase.

O ensaio à compressão uniaxial de fluência tem um procedimento simples e é de custo reduzido. Os provetes podem ser extraídos de pavimentos existentes ou moldados em laboratório. Os provetes devem ter as faces devidamente preparadas de modo que exista o paralelismo, para que a carga seja aplicada uniaxialmente.

A temperatura é uma variável importante, uma vez que esta influencia significativamente no comportamento mecânico de misturas betuminosas sendo, portanto, de fundamental importância a manutenção de temperatura constante quando da realização do ensaio. Podem é ser feitos vários ensaios variando o valor da temperatura.

Quando a carga é aplicada o provete ou se deforma sem ruptura ou acaba por se partir. Porém existe a hipótese de este não colapsar, mas também não ser apto a resistir às deformações permanentes. É por causa desta situação que existem critérios para definir a rejeição dos provetes que atinjam determinadas deformações.

3.2.4 Ensaios de Simulação

Nestes ensaios o objectivo é simular o mais aproximadamente as acções do tráfego, utilizando para esse efeito um rodado. Estes ensaios podem ser realizados a escala reduzida em laboratório com condições controladas, ou serem realizados numa escala real em pista. Os ensaios de simulação em laboratório (wheel tracking) são os que se encontram no âmbito deste trabalho, pois são equipamentos de laboratório simples podendo num futuro ser quotidianamente utilizados para a caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente. Os ensaios de simulação à escala real são equipamentos complexos e extremamente dispendiosos. A sua utilização é sobretudo para conduzir trabalhos de investigação e de desenvolvimento tecnológico de materiais. Realiza-se no entanto uma abordagem a estes equipamentos pois os conhecimentos que estes permitem obter são de enorme valia.

O conceito subjacente ao ensaio de simulação de tráfego em laboratório é bastante intuitivo, pois o objectivo é observar o comportamento de uma amostra de mistura betuminosa quando solicitada por um pequeno rodado, tentando simular a uma escala inferior o que se passa num pavimento. Embora todos os ensaios de simulação sejam semelhantes, existem diferenças entre eles, que vão desde a carga aplicada, forma como a carga é aplicada, diâmetro e tipo de roda, velocidade de roda, realização do ensaio ao ar ou em imersão, etc. Foram desenvolvidos em diferentes países diversos equipamentos para este fim. Como exemplo de equipamentos utilizados podem referir-se (Prithvi *et al.* 2002):

- Asphalt Pavement Analyser (APA) - este equipamento é um desenvolvimento do GLWT (Georgia Loaded Wheel Tester);
- Hamburg Wheel Tracker Device - equipamento desenvolvido na Alemanha;
- O Nottingham Rutting Tester - da universidade com o mesmo nome (Inglaterra);
- Georgia Loaded Wheel Tester - do Estado da Georgia nos EUA, de onde deriva o APA;
- Orniéreur do LCPC – equipamento com génese em França

Os ensaios de simulação de tráfego em pista pretendem estudar o comportamento dos pavimentos em escala real. Neste caso o provete é, por assim dizer, um troço de pavimento, e a aplicação de cargas é realizada com rodados de camião, existindo alguns casos em que se realizaram troços experimentais com o carregamento realizado com camiões. Este tipo de equipamentos recebe correntemente a designação ALF (Accelerated Load Facility) pois pretende simular de forma mais rápida o que acontece na realidade nos pavimentos.

Estes ensaios têm a vantagem de simular a realidade de forma mais satisfatória, quer no que se refere à estrutura do pavimento (número e constituição das camadas, fabrico e colocação), quer no que se refere à aplicação das cargas (valor da carga, dimensão, configuração, velocidade e distribuição lateral). Nem todos os equipamentos dispõem de todas estas possibilidades existindo diferenças entre eles, aliás, cada equipamento é por assim dizer único uma vez que são construídos de raiz segundo as especificações desejadas.

Existe alguma variedade nestes equipamentos, alguns assemelhando-se a equipamentos de wheel tracking mas em escala real. Alguns situam-se em recintos fechados, o que tem a vantagem de factores como a temperatura e a humidade serem controlados, permitindo que se realizem estudos em que estes factores são conhecidos. Alguns funcionam sob as condições atmosféricas existentes, tornando o ensaio mais real, mas tendo a desvantagem de os factores climáticos não serem controlados, apenas podendo ser monitorizados. Existem equipamentos que permitem as duas possibilidades e ainda alguns que são móveis podendo realizar os ensaios em troços reais.

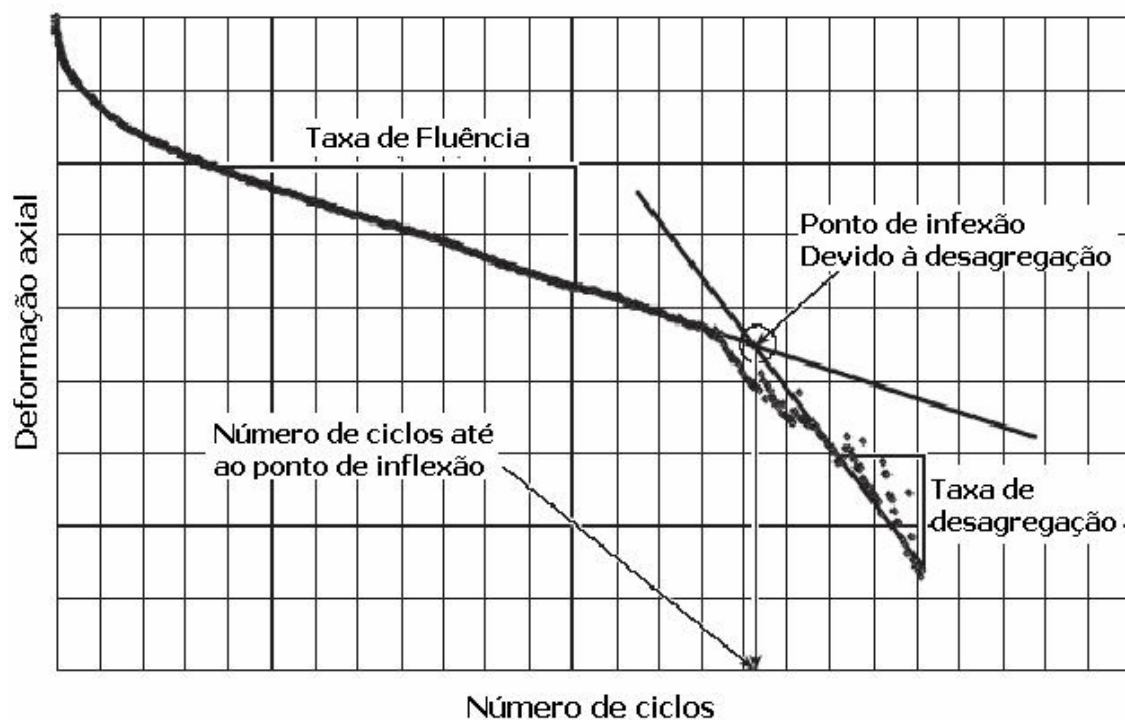


Figura 3.18 – Curva obtida em ensaio com equipamento de simulação de Hamburg (Yildirim & Kennedy 2001)

O gráfico na figura 3.18 relaciona a deformação das misturas betuminosas em função do número de ciclos a que esta está sujeita. Conforme é possível verificar, a um aumento do número de ciclos corresponde um aumento de deformação. Porém para um determinado número de ciclos, que de entre outros factores depende da constituição da mistura, a mistura pode ou não iniciar o seu processo de degradação. O nome que se dá a esse valor do número de ciclos é ponto de inflexão.

4 TEMPERATURA EM PAVIMENTOS

Como vimos anteriormente, a temperatura tem uma grande influência nas camadas betuminosas e consequentemente nos pavimentos. Para se prever a deformação de um pavimento, é necessário conhecer todas as temperaturas a que este vai estar sujeito. Neste capítulo, são analisados, alguns dos métodos que determinam as temperaturas nos pavimentos.

4.1 Método SHELL

A Shell desenvolveu uma metodologia para ter em consideração a variação da temperatura em camadas betuminosas, onde é calculada uma temperatura ponderada do ar (T_{pond}) a partir das temperaturas médias mensais.

As temperaturas médias mensais do ar para o nosso País encontram-se publicadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica correspondentes ao período 1951-1980, estando distribuídas em quatro volumes correspondentes a quatro regiões:

- 1ª Região: Entre Douro e Minho e Beira Litoral
- 2ª Região: Ribatejo e Oeste
- 3ª Região: Trás-os-Montes e Alto Douro e Beira Interior
- 4ª Região: Alentejo e Algarve

No quadro 4.1 apresentam-se as temperaturas médias mensais do ar para as capitais de distrito do nosso País, que se encontram publicadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, correspondentes ao período 1951-1980.

Na figura 4.1 (gráfico da esquerda) apresenta-se o gráfico que, de acordo com aquela metodologia permite obter, em ordenada, o factor de ponderação correspondente à temperatura média mensal de cada um dos 12 meses do ano, apresentada em abcissa. A partir do valor em ordenada da média dos doze factores de ponderação, é possível obter o valor da temperatura ponderada do ar.

Na figura 4.1 (gráfico da direita) indica-se o procedimento proposto pela Shell para obter, a partir da temperatura ponderada do ar, a temperatura nas camadas betuminosas, para diferentes profundidades.

Quadro 4.1 - Temperaturas médias mensais do ar no período 1951-1980 (SHELL 1978)

Cidade	Mês											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Aveiro (S. Jacinto)	10,1	10,6	12,0	13,4	15,1	17,0	18,2	18,6	17,9	16,2	12,6	10,0
Braga	8,7	9,1	10,9	12,4	15,2	18,2	20,2	19,8	18,4	15,3	11,2	8,9
Bragança	4,5	5,6	7,9	10,1	13,6	17,5	20,7	20,4	17,7	12,8	7,8	4,7
Castelo Branco	8,2	9,2	11,2	13,7	17,2	21,0	24,5	24,4	21,6	16,7	11,4	8,6
Coimbra	10,0	10,7	12,4	14,2	16,7	19,4	21,7	21,6	20,4	17,3	12,8	10,2
Évora	9,3	9,9	11,5	13,6	16,6	19,9	22,8	23,0	21,1	17,1	12,4	9,7
Faro	12,0	12,6	13,2	15,6	17,3	20,5	23,2	23,2	21,3	18,3	14,6	12,2
Guarda	3,8	4,1	6,1	8,1	11,7	15,5	18,8	18,5	16,3	11,6	6,7	4,1
Leiria (Marinha Grande)	9,4	9,8	11,9	13,1	15,4	17,5	19,2	19,2	18,6	16,1	12,0	9,0
Lisboa	10,7	11,4	12,8	14,7	17,1	19,8	22,0	22,3	21,1	18,0	13,7	11,1
Portalegre	8,5	9,0	10,7	12,8	16,1	19,8	23,2	23,3	21,0	16,5	11,7	9,0
Porto (Serra do Pilar)	9,3	9,8	11,5	13,1	15,4	17,9	19,8	19,6	18,6	16,1	12,0	9,6
Santarém	9,9	10,8	12,5	14,4	17,1	20,1	22,7	22,8	21,2	17,7	12,9	10,2
Setúbal (Alcácer do Sal)	10,3	11,2	12,8	14,7	17,6	20,6	22,9	23,0	21,3	17,8	13,4	10,5
Viana do Castelo	9,5	10,4	10,9	12,9	14,9	17,8	20,0	19,5	18,6	15,3	11,9	9,8
Vila Real	6,4	7,5	9,6	11,8	14,9	18,5	21,4	21,1	18,8	14,4	9,4	6,6
Viseu	6,6	7,4	9,3	11,3	14,6	17,8	20,5	20,0	18,0	14,4	9,4	7,0

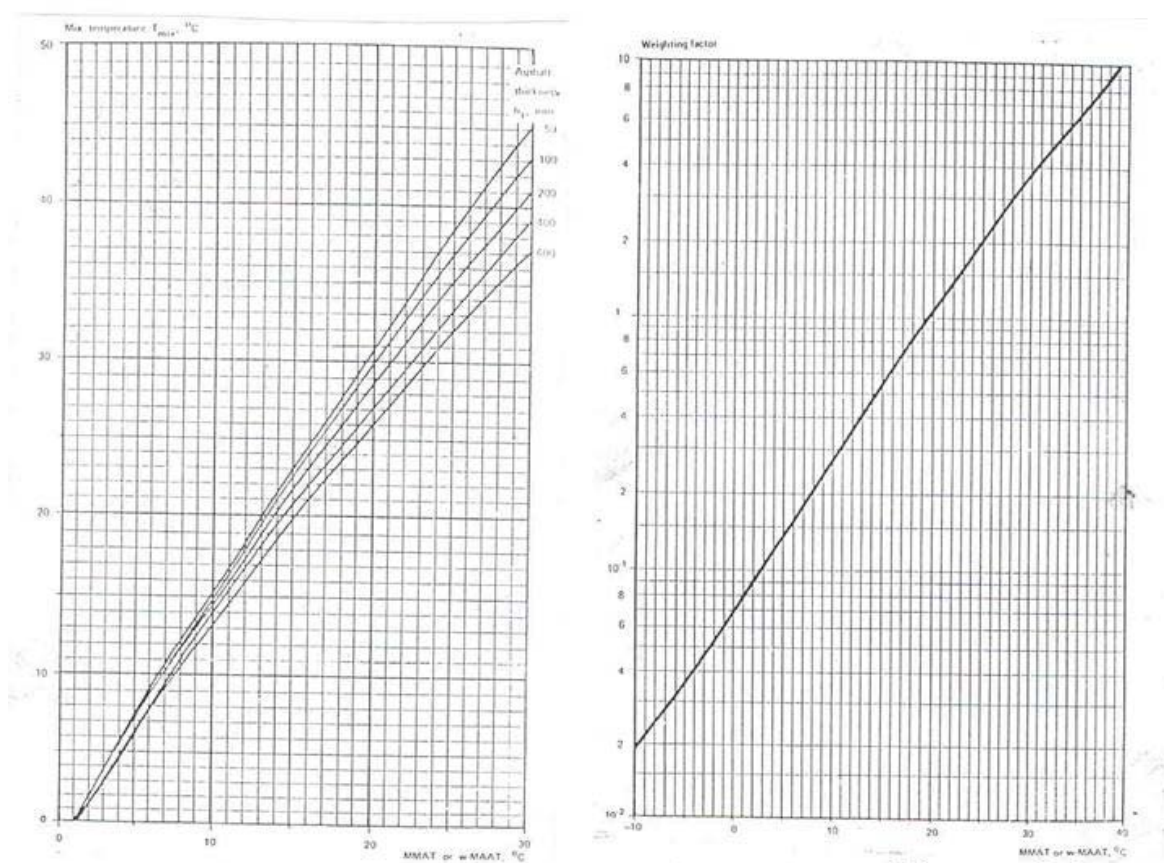


Figura 4.1 – Relação entre a temperatura média mensal do ar ou a temperatura ponderada do ar e o factor de ponderação e relação entre a temperatura ponderada do ar e a temperatura nas camadas betuminosas (SHELL 1978)

4.2 Método do Espectro Médio

Este método é utilizado para o cálculo da temperatura de serviço. Este método permite obter a temperatura para cada pavimento, a diferentes profundidades, em função da temperatura do ar. É válido para qualquer tipo de pavimento e independente da região do país (Aquino 2000).

A expressão que permite calcular a temperatura de serviço a qualquer profundidade é dada pela seguinte expressão:

$$T = 6,846 \cdot z^{0,111} \cdot TA^{0,297}$$

em que:

T = temperatura de serviço

z = profundidade a que se pretende conhecer o valor de temperatura

TA = temperatura média do ar

A temperatura média do ar, TA , é obtida através de uma ponderação que toma em consideração a temperatura máxima, $TA_{máx}$, e a temperatura mínima, $TA_{mín}$:

$$TA = 0,1835 \cdot TA_{máx} + 0,8165 \cdot TA_{mín}$$

De referir ainda que as temperaturas $TA_{máx}$ e $TA_{mín}$ são retiradas do quadro 4.2:

Quadro 4.2 - Temperatura Média Máxima Mensal do ar e Temperatura Média Mínima Mensal do ar, para o mês de Agosto (Aquino 2000).

Localização	Alcobaça	Beja	Bigorne	Braga	Bragança	C. Carvoeiro	C. da Roca	Caramulo	Cast.	Chaves
$TA_{máx}$	26,1	32,2	24,0	27,1	27,9	20,8	20,7	24,4	31,7	28,5
$TA_{mín}$	13,9	15,3	11,4	12,8	13,2	16,1	15,4	14,0	17,1	11,4
Localização	Coimbra	Elvas	Évora	F. C.	Faro	Fundão	Guarda	Lisboa	M. do Douro	Mira
$TA_{máx}$	28,3	32,5	30,0	29,0	28,8	30,1	23,7	27,7	28,2	24,5
$TA_{mín}$	14,9	15,6	16,0	12,1	17,8	14,7	13,1	17,6	13,1	12,7
Localização	Mirandela	Mont-o-Velho	Mora	Ota	Portalegre	Porto-P. Rubra	Porto-S. Pilar	Praia Rocha	S. Bárbara	S. Jacinto
$TA_{máx}$	31,1	25,7	30,9	28,4	29,4	23,9	24,7	28,0	31,9	21,9
$TA_{mín}$	14,4	14,3	15,2	16,4	16,9	13,6	14,6	17,9	15,7	14,9
Localização	Santarém	Sesimbra	Setúbal	Sines	Tancos	V. do Castelo	V.R.S. António	Vila Real	Viseu	Zambujeira
$TA_{máx}$	30,0	27,4	29,2	21,6	30,2	25,5	30,2	28,3	28,7	25,6
$TA_{mín}$	14,8	12,6	15,6	16,2	15,2	13,9	17,7	13,5	12,3	13,8

Considere-se o exemplo da região de Castelo Branco. Após a consulta do quadro é possível obter-se os valores de $TA_{máx}$ e $TA_{mín}$ respectivamente 31,7°C e 17,1°C. Substituindo na equação vem:

$$TA = 0,1835 \cdot (31,7) + 0,8165 \cdot (17,1) = 19,8$$

Tendo encontrado o valor de TA, substituí-se na seguinte expressão:

$$T = 6,846 \cdot z^{0,111} \cdot (19,8)^{0,297}$$

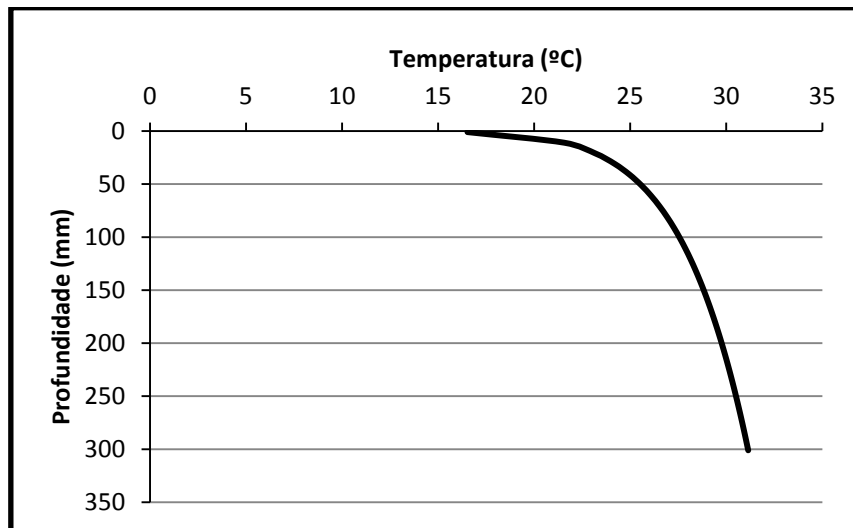


Figura 4.2 – Variação da temperatura de serviço com a profundidade, caso de Castelo Branco (Aquino 2000)

4.3 Método PG

A classificação PG (Performance Graduation) de um betume nasceu da necessidade do Federal Highway Administration, nos Estados Unidos, de melhorar as anteriores caracterizações de betume até então, de forma a serem obtidos melhores comportamentos em serviço nas suas estradas (Asphalt Institute 1983).

As formas ditas tradicionais de se classificar um betume têm por base os testes às propriedades físicas dos betumes, como os testes de penetração, anel e bola e viscosidades. Acontece que estes testes são efectuados a temperaturas padrão o que limita bastante os seus resultados pois não consegue fornecer informação para um largo grupo de temperaturas.

Para uma correcta avaliação da performance dos betumes será essencial conhecer as diferentes propriedades destes numa vasta gama de valores de temperatura. Consequência do reconhecimento desta sociedade, são o conjunto de especificações SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) que, utilizando novos testes, avaliam as propriedades dos betumes de acordo com as condições climáticas a que estes estarão sujeitos, com a finalidade última de melhorar a performance dos pavimentos pelo controlo da deformação permanente, fracturas térmicas a baixas temperaturas e fendilhamento por fadiga. Conhecendo o resultado dos testes efectuados aos betumes, em que lhes são exigidas determinadas propriedades físicas consoante a temperatura a que irão estar sujeitos em serviço, é então possível aplicar a classificação PG propriamente dita.

Como foi referido, os ligantes asfálticos são seleccionados com base no clima em que o pavimento irá ser utilizado. A distinção entre as várias graduações de ligante asfáltico é a temperatura mínima e máxima especificada à qual os requisitos têm que corresponder. Por exemplo, um ligante asfáltico classificado como PG 58-34 significa que o betume preenche os critérios de propriedades físicas a altas temperaturas até uma temperatura de 58°C e os critérios de propriedades físicas a baixas temperaturas até -34°C.

Mesmo com graduações de betume de acordo com a temperatura mais alta e a temperatura mais baixa, é necessária mais informação a fim de seleccionar um betume para uma situação particular. Um módulo do programa de computador da SUPERPAVE, ajuda os utilizadores na selecção dos graus de betume. O software SUPERPAVE contém três métodos através dos quais o utilizador pode seleccionar a graduação do betume:

- Área geográfica: uma agência desenvolverá uma carta mostrando o grau de betume a ser utilizado com base no clima ou em outros procedimentos pré-estabelecidos.
- Temperatura de pavimento: o projectista determina a temperatura de projecto do pavimento.
- Temperatura do ar: o projectista determina as temperaturas do ar, que são convertidas nas temperaturas de projecto do pavimento.

O software SUPERPAVE dá assistência ao 3º método, fornecendo uma base de dados com informação meteorológica proveniente de 6092 estações climáticas nos EUA e Canadá, o que permite ao utilizador seleccionar o grau de betume adequado ao clima do local do projecto.

Para cada ano de funcionamento destas estações, foram identificados os períodos de 7 dias mais quentes e foi calculada a temperatura máxima média do ar nestes períodos. Os investigadores da SHRP seleccionaram este valor médio dos 7 dias com método óptimo de caracterização do padrão das situações de altas temperaturas. Foram informatizadas a média e o desvio padrão da temperatura máxima média do ar, nos períodos de 7 dias, para todos os anos de funcionamento. Da mesma forma, foi identificado o dia de cada ano com a temperatura mínima do ar e foi calculada a média e o desvio padrão para todos os anos de registo. As estações meteorológicas com menos de 20 anos de funcionamento não foram envolvidas.

Todavia, a formulação de temperaturas usadas para seleccionar os graus de betume é a temperatura de pavimento e não a temperatura do ar. Para as camadas superficiais, a SUPERPAVE define a alta temperatura de projecto, a uma profundidade de 20 mm da superfície do pavimento, e a temperaturas de projecto mais baixa, à superfície do pavimento.

Utilizando análises teóricas de condições reais, executadas com modelos para fluxo puro de calor e equilíbrio de energia e assumindo valores típicos para a absorção solar, a transmissão da radiação através do ar, radiação atmosférica e velocidade do vento, foi desenvolvida a equação abaixo para determinação da temperatura á superfície do pavimento:

$$T_{20mm} = (T_{ar} - 0,00618 \times Lat^2 + 0,2289 \times Lat + 42,2) \times (0,9545) - 17,78$$

em que:

T_{20mm} = padrão de temperatura do pavimento superior a uma profundidade de 20 mm

T_{ar} = média das temperaturas altas do ar, num período de 7 dias

Lat = latitude geográfica do projecto, em graus

A temperatura de projecto mais baixa à superfície do pavimento é calculada como uma função das temperaturas baixas do ar, usando a seguinte equação:

$$T_{surf} = 0,859 \times T_{ar} + 1,7$$

em que:

T_{ar} = temperatura mínima diurna do ar

O sistema SUPERPAVE permite o uso de medições fiáveis para a determinação do grau de risco das temperaturas de projecto mais altas e mais baixas, usadas na selecção do grau de betume. Tal como está definido pelo SUPERPAVE, a fiabilidade é a probabilidade percentual num único ano de temperatura real não exceder a temperatura de projecto seleccionada. Uma fiabilidade mais alta significa um risco mais baixo.

Considere-se por exemplo as temperaturas do ar no verão em Cleveland, Ohio, que considera uma média máxima para 7 dias e 32°C com um desvio padrão de 2°C. Num ano médio, existe 50% de probabilidade de que a temperatura máxima do ar num período de 7 dias exceda os 32°C. Todavia, assumindo uma frequência de distribuição estatística normal, existe apenas uma percentagem de 2% da temperatura máxima nos 7 dias exceder 36°C (média mais dois desvios padrão); portanto, tal como é mostrado na figura 4.3, uma formulação da temperatura do ar de 36°C irá permitir 98% de fiabilidade.

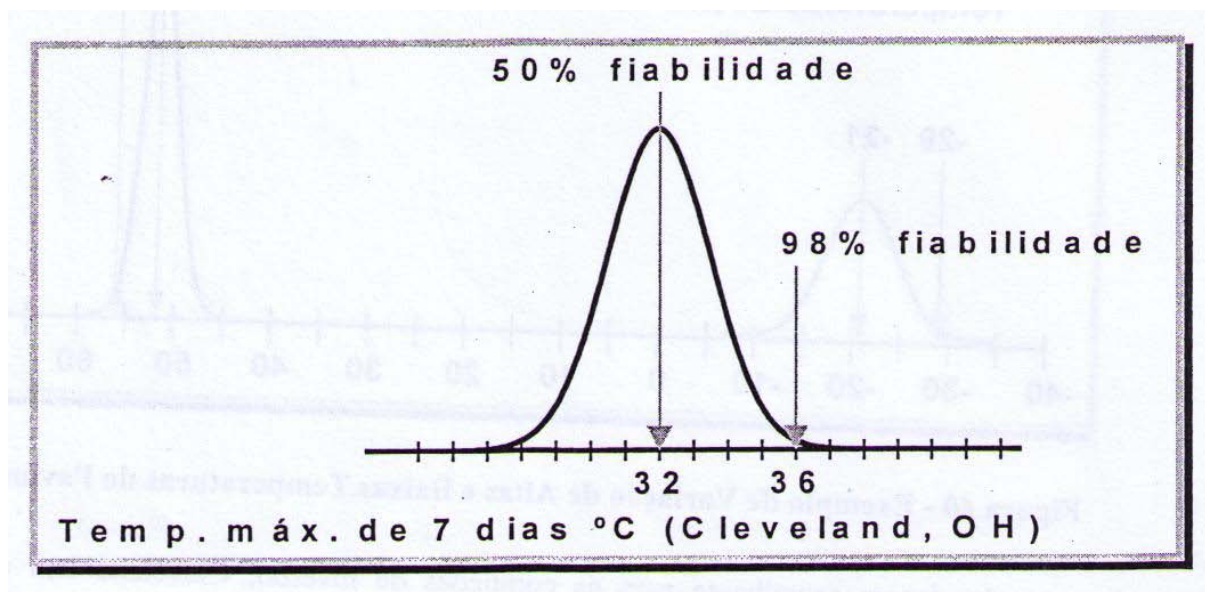


Figura 4.3 – Fiabilidade da Temperatura de Projecto (SHRP 1994a)

- Selecção da temperatura do ar

Continuando o exemplo, assumiu-se que o betume está destinado a Cleveland. Na figura 4.4 está a representação gráfica da variação estatística de duas formulações de temperatura do ar.

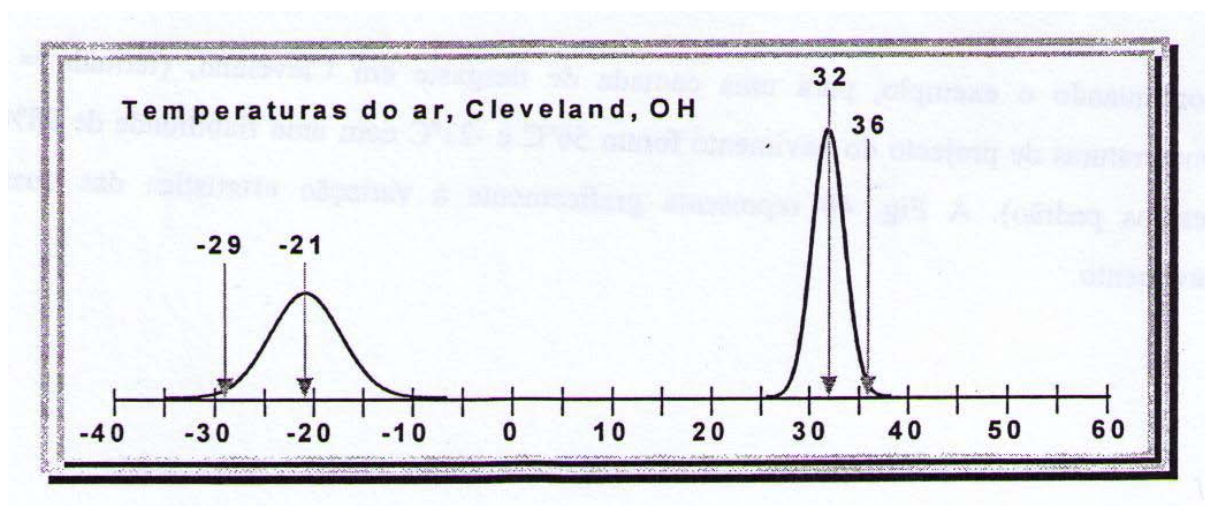


Figura 4.4 – Exemplos de Variação de Altas e Baixas Temperaturas do Ar (SHRP 1994a)

Num Verão normal, a média da temperatura máxima do ar num período de 7 dias é de 32°C e num Verão excepcionalmente quente, esta média pode atingir os 36°C.

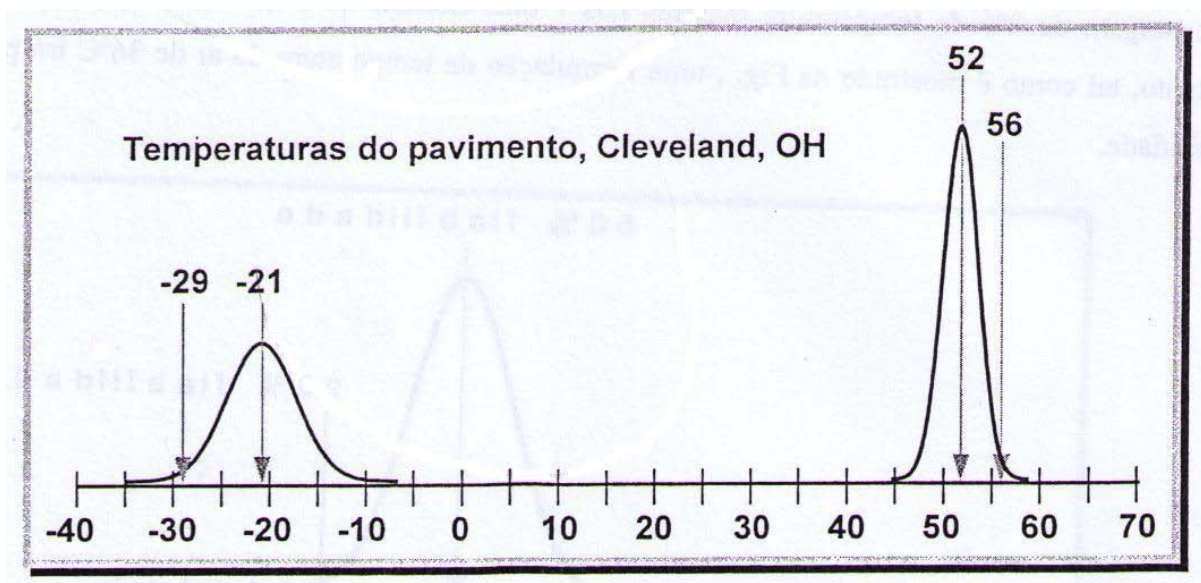


Figura 4.5 – Exemplo de Variação de Altas e Baixas Temperaturas do Pavimento (SHRP 1994a)

Utilizando uma abordagem semelhante para as condições de Inverno, Cleveland tem uma temperatura mínima média do ar de -21°C, com um desvio padrão de 4°C. Consequentemente, num Inverno habitual, a temperatura mais baixa será de -21°C. Para um Inverno muito frio, a temperatura do ar pode atingir os -29°C. Os desvios padrão mostram que existe uma variação superior nas temperaturas baixas do que a média das temperaturas altas de 7 dias.

- Selecção da temperatura de pavimento

Continuando o exemplo, para uma camada de desgaste em Cleveland, (latitude = 41,42 graus) as temperaturas de projecto do pavimento foram 56°C e -23°C com uma fiabilidade de 98% (média mais dois desvios padrão). A figura 4.6 representa graficamente a variação estatística das duas temperaturas do pavimento.

Para se conseguir uma fiabilidade de pelo menos 50% e tentar uma temperatura máxima média do pavimento de pelo menos 52°C, a graduação de alta temperatura coincide com a formulação de temperatura, PG 52. Usando o mesmo raciocínio, a graduação de baixa temperatura

também corresponde ao padrão de temperatura -16. Como se vê na figura 4.7, para se obter pelo menos 98% de fiabilidade, é necessário seleccionar uma graduação de alta temperatura de PG58 para obter protecção acima dos 56°C e um grau de temperatura baixa de PG -28 que permite protecção abaixo dos -23°C. Em ambos os casos (altas e baixas temperaturas) de ligante asfáltico com PG 58-28, a fiabilidade real excede os 99% devido ao “arredondamento para cima” causado pela diferença de 6 graus entre as graduações standard.

Este “arredondamento para cima” introduz uma atitude conservadora no processo de selecção de betumes. Outra fonte possível de conservadorismo ocorre quando se consideram os mesmos passos, verificados nos testes de classificação de betumes. Embora um betume específico possa preencher todos os critérios quando testado a altas temperaturas e baixas temperaturas, apesar disso, ele irá ser classificado com um “arredondamento para baixo” no nível seguinte de “seis-graus” do sistema de graduação. O resultado final é o de que, está incluído um factor significativo de segurança no esquema de selecção de betumes. Por exemplo, é possível que um betume com um PG 52-16, previamente seleccionado com um mínimo de fiabilidade de 50% para Cleveland, pudesse na realidade ter sido graduado com um PG 56-20, se essa graduação existisse. Os utilizadores deste sistema gradativo de classificação dos betumes, baseado na temperatura, devem reconhecer que já estão incluídas salvaguardas no processo. Devido a estes factores, pode não ser necessário, sem ter uma boa relação de custo/benefício, requerer indiscriminadamente valores elevados de fiabilidade, ou graduações de temperatura alta ou baixa, anormalmente conservadoras.

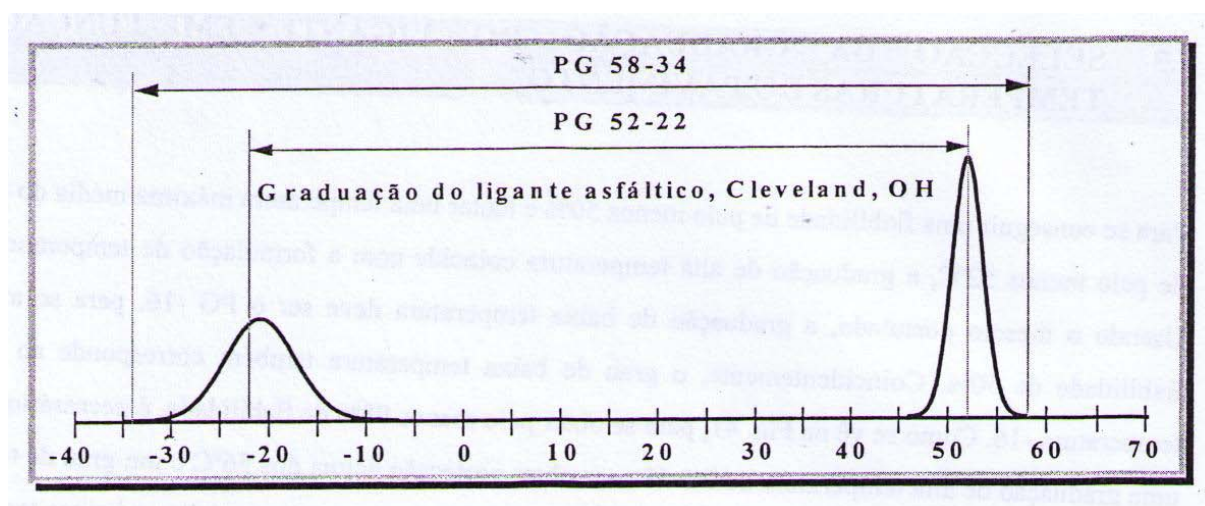


Figura 4.6 – Selecções da Graduação de Ligante Asfáltico SUPERPAVE para Cleveland (SHRP 1994a)

O software SUPERPAVE executa todos estes cálculos com um esforço mínimo do utilizador. Para qualquer localização, o utilizador pode introduzir uma fiabilidade mínima e o software irá calcular a graduação necessária do betume. Em alternativa, o utilizador pode especificar a graduação de betume desejada e a SUPERPAVE calculará a fiabilidade obtida para o clima e o local em questão. Consequentemente, as empresas são confrontadas com decisões de gestão de engenharia. Elas terão que decidir o nível de fiabilidade a empregar. Dependendo da política estabelecida por cada empresa individual, a fiabilidade seleccionada pode ser função da classificação da estrada, do nível de tráfego, do custo e de outros factores.

Deve ter-se em atenção que uma selecção de betume adequada ou conservadora não dá garantia absoluta da performance total do pavimento. Por exemplo, a performance de fendilhamento de fadiga é muito afectada pela estrutura do pavimento e pela intensidade do tráfego. A deformação permanente, está em função directa da tensão de corte da mistura, a qual é muito influenciada pelas propriedades do agregado. A fractura térmica do pavimento a baixas temperaturas, tem uma correlação significativa com as propriedades do betume. Os projectistas devem tentar um equilíbrio entre os muitos factores, quando seleccionam os betumes.

- Ajuste da selecção da graduação do betume devido à velocidade e volume do tráfego

O procedimento descrito de selecção de ligante, é o procedimento básico para as condições habituais de carga nas auto-estradas. Sob estas condições, assume-se que o pavimento está submetido a um número padrão de cargas rápidas e transitórias. Para uma situação de projecto a altas temperaturas, controlada por propriedades especificadas e relacionadas com a deformação permanente. Uma modificação proposta da especificação AASHTO MP1, inclui um aumento de grau adicional (uma categoria) na graduação de betume seleccionada para alta temperatura a fim de ter em conta as aplicações de cargas transitórias e lentas e as aplicações mantidas.

Semelhante à derivação tempo/temperatura descrita para o teste de temperatura do RFE (testando a uma temperatura 10°C acima, reduz o tempo de teste de 2 horas para 60 seg.), graus de temperatura máxima mais elevados permitem compensar o efeito de uma velocidade de carga baixa. Para formulações de cargas em movimento lento, o betume deve ser seleccionado 1 grau de temperatura alta para a direita (1 grau mais quente), ou seja um PG 64 em vez de um PG 58. Para

uma formulação de cargas paradas, o betume deve ser seleccionado a 2 graus de temperatura alta para a direita, ou seja, 2 graus mais quente, ou seja, um PG 70 em vez de um PG 58.

Também é proposto um aumento de grau adicional para números extraordinariamente elevados de carga de trânsito pesado. Essas serão localizações em que o padrão do tráfego é esperado exceder os 10E6 Número Equivalente de Eixos Padrão (NEEP). Um NEEP é definido como eixo duplo de 4 rodas de 8000 kg. (80 kN). É a unidade empregue pela maioria dos procedimentos de cálculo de espessura de pavimentos, para quantificar os vários tipos de cargas/eixo num padrão unitário de números de tráfego. Se o tráfego esperado estiver entre 10E6 e 30E6 NEEPs, o engenheiro deve considerar um grau de betume de alta temperatura mais elevado que o seleccionado apenas em função do clima. Se o padrão de tráfego esperado exceder os 30E6 NEEP, o betume deve ser seleccionado 1 grau de alta temperatura acima.

4.4 Método Localização Geográfica

Este é o método de atribuição de temperaturas ao pavimento utilizado na elaboração do programa DEFPERM.

A distribuição da temperatura num pavimento asfáltico é directamente afectada pelas condições climáticas a que o pavimento está sujeito. A intensidade da radiação solar é dependente dos ciclos diurnos, da latitude e do ângulo feito pelos raios solares com a superfície terrestre. A capacidade de se prever a temperatura de um pavimento, para as suas diversas profundidades, no tempo e no espaço, confere uma ajuda preciosa aos engenheiros de forma a serem melhores estimados, os parâmetros necessários ao dimensionamento de um pavimento, em concreto à deformação permanente.

É proposta a seguinte expressão para determinar a temperatura de um pavimento durante o dia (Berhanu 2009):

$$T_{d(t)} = T_{d(\min)} + [T_{d(\max)} - T_{d(\min)}] \cdot \sin \left[\pi \cdot \frac{(t - t_r - \beta)}{DL + 2(\alpha - \beta)} \right]$$

onde:

$T_{d(t)}$ = temperatura de pavimento à profundidade d e à hora t

$T_{d(\min)}$ = temperatura mínima à profundidade d

$T_{d(\max)}$ = temperatura máxima à profundidade d

t_r = hora do nascer do sol

DL = duração do dia

α = diferença entre as 12h e a hora de temperatura de pav. máxima

β = diferença entre a hora do nascer do sol e a hora de temperatura mínima de pav.

A temperatura de um pavimento para uma determinada hora, após o pôr-do-sol, é dada pela seguinte expressão (Berhanu 2009):

$$T_{d(t)} = T_{d(\min)}^n + [T_{d(t_s)} - T_{d(\min)}^n]^{\left[\frac{\gamma(t-t_s)}{24-DL+\beta}\right]}$$

$T_{d(t)}$ = temperatura de pavimento à profundidade d e à hora t

$T_{d(\min)}^n$ = temperatura mínima de pavimento à profundidade d do dia seguinte

$T_{d(t_s)}$ = temperatura de pavimento à profundidade d ao pôr – do – sol

t = tempo a que se pretende determinar a temperatura

t_s = tempo do pôr – do – sol

DL = duração do dia

β = diferença entre a hora do nascer do sol e a hora de temperatura mínima de pav.

A temperatura de pavimento máxima e mínima, para uma dada profundidade, dependem por sua vez da profundidade e das temperaturas, ao nível do pavimento, respectivamente máximas e mínimas:

$$T_{d(\max)} = (T_{s(\max)} + 17,8) \cdot (1 - 2,48 \times 10^{-3} \cdot d + 1,085 \times 10^{-5} \cdot d^2 - 2,441 \times 10^{-8} \cdot d^3) - 17,8$$

$$T_{d(\min)} = T_{s(\min)} + 5,1 \times 10^{-2} \cdot d - 6,3 \times 10^{-5} \cdot d^2$$

onde:

$$T_{d(\max)} = \text{temperatura máxima à profundidade } d$$

$$T_{d(\min)} = \text{temperatura mínima à profundidade } d$$

$$T_{s(\max)} = \text{temperatura máxima à superfície}$$

$$T_{s(\min)} = \text{temperatura mínima à superfície}$$

$$d = \text{profundidade, em mm}$$

Para se conhecer as temperaturas extremas para qualquer profundidade de um pavimento é necessário conhecerem-se as temperaturas extremas à superfície:

$$T_{s(\max)} = T_{air(\max)} + 24,5 \cdot (\cos(Z_n))^2$$

$$T_{s(\min)} = 0,89 \cdot T_{air(\min)} + 5,2$$

onde:

$$T_{s(\max)} = \text{temperatura máxima à superfície}$$

$$T_{s(\min)} = \text{temperatura mínima à superfície}$$

$$T_{air(\max)} = \text{temperatura máxima do ar}$$

$$T_{air(\min)} = \text{temperatura mínima do ar}$$

$$Z_n = \text{Ângulo de Zenit às 12h}$$

O ângulo de Zenit é dado pela expressão:

$$\cos(Z_n) = \sin(lat) \cdot \sin(dec) + \cos(lat) \cdot \cos(dec)$$

onde:

$$lat = \textit{latitude do local}$$

$$dec = \textit{declinação do local}$$

A declinação é dada pela seguinte expressão:

$$\textit{declinação} = -23,45^\circ \cdot \cos\left[\frac{360^\circ}{365} \cdot (N + 10)\right]$$

onde:

$$N = \textit{dia do ano (no dia 1 de Janeiro, } N = 1)$$

5 MÉTODO SIMPLIFICADO PARA A DETERMINAÇÃO DE DEFORMAÇÕES PERMANENTES

Um dos principais objectivos deste trabalho é simular/determinar a deformação permanente, para um pavimento, em função da temperatura, das características dos materiais que o compõem e das cargas actuantes.

Existem alguns programas computacionais já existentes que permitem estudar o comportamento mecânico dos pavimentos, encontrando-se alguns dos mais utilizados resumidos no quadro 5.1:

Quadro 5.1 - Programas computacionais para o cálculo mecânico em pavimentos

Código Computacional	Modelo	Teste Laboratorial	Autor(es)
BISAR	Teoria das camadas elásticas lineares	Ensaio de compressão uniaxial	Van de Loo
ELSYM	Teoria das camadas elásticas lineares	Ensaio triaxiais de cargas repetidas / Ensaio de Compressão	Monismith, Inkabi, Freeme and Mclean
ORN093	Teoria das camadas elásticas lineares	Ensaio dinâmico triaxial	Verstraeten, Romain and Mclean
MOREL	Teoria das camadas viscoelásticas lineares	Ensaio uniaxiais de fluência	Battiato, Ronco and Verga
VESYS	Probabilístico de soluções viscoelásticas lineares	Ensaio uniaxiais de cargas repetidas	Kenis
FEPAVE II	Método de elementos finitos	Ensaio triaxial dinâmico	Meyer and Hass
DEFPV	Método não-linear elementos finitos	Ensaio uniaxiais de cargas repetidas	Brown and Bell
VEROAD	Teoria das camadas viscoelásticas lineares	Ensaio triaxiais de fluência estática	Hopman, Nilsson and Pronk
CAPA-3D	Método não-linear elementos finitos	Ensaio uniaxiais de tracção e compressão	Scarpas, Al-Khoury, Gorp and Erkens

Os métodos práticos/empíricos são os métodos mais utilizados para pavimentos flexíveis. Estes métodos são baseados na teoria de camadas elásticas de Burmister, apresentando, entre outras potencialidades, a possibilidade de se permitir a definição dos valores das tensões aplicadas nos pavimentos, tendo o inconveniente de não possibilitar prever a deformação que ocorre neste.

Por este motivo, optou-se por construir um método não só para poderem ser obtidos valores de deformação permanente, como para podermos introduzir as variáveis de cálculo da forma que desejamos. A metodologia de cálculo utilizada no cálculo das deformações consiste num conjunto de etapas que, para uma utilização mais generalizada, recorre a um programa de cálculo que foi denominado por DEFPERM.FOR, cujo código foi escrito em linguagem FORTRAN.

5.1 Descrição do Método

O esquema abaixo permite ilustrar o modo de funcionamento do método utilizado, evidenciando o modo como todas as suas condicionantes irão afectar o cálculo da deformação.

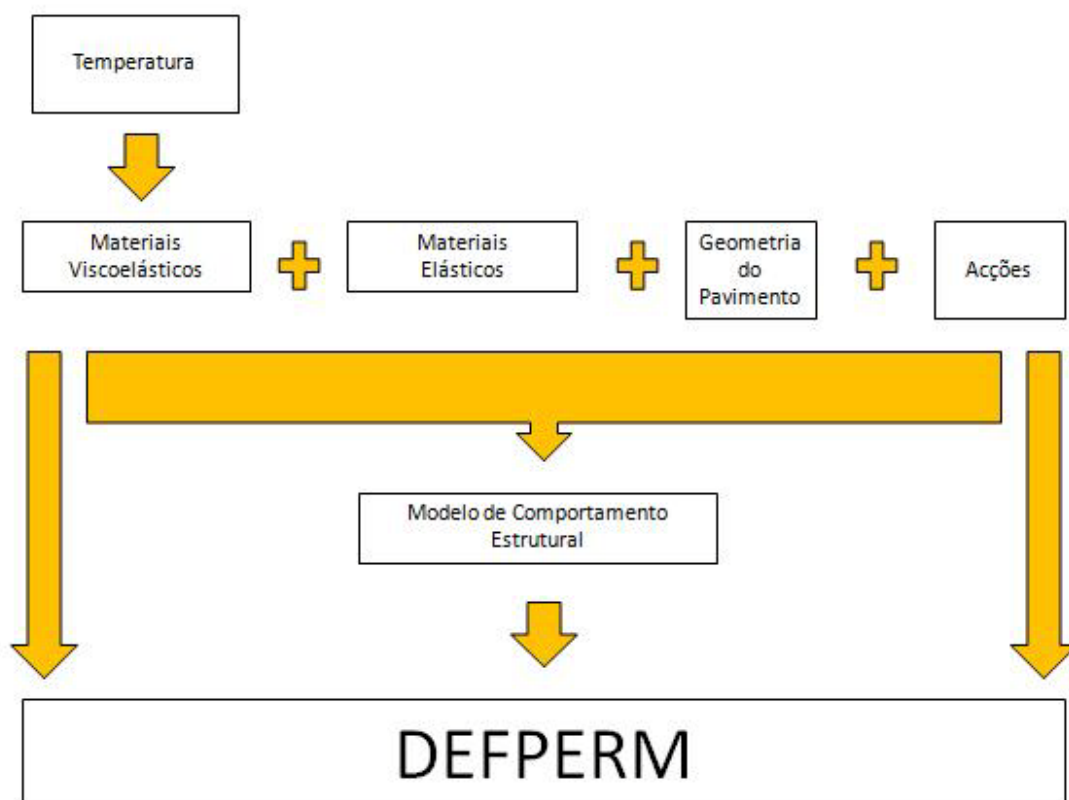


Figura 5.1 – Relações entre o programa DEFPERM

5.1.1 Temperatura

Como foi visto anteriormente, a temperatura afecta as características dos materiais viscoelásticos e como tal é necessário determinar o seu valor. Assim, em função da localização geográfica, do dia do ano e das temperaturas máximas e mínimas do ar, é possível determinar-se a temperatura para uma dada hora e a uma dada profundidade. A partir daí é possível prever-se as características dos materiais viscoelásticos.

$$T_{d(t)} = T_{d(\min)} + [T_{d(\max)} - T_{d(\min)}] \cdot \sin \left[\pi \cdot \frac{(t - t_r - \beta)}{DL + 2(\alpha - \beta)} \right]$$

$$T_{d(t)} = T_{d(\min)}^n + [T_{d(t_s)} - T_{d(\min)}^n] \left[\frac{\gamma(t - t_s)}{24 - DL + \beta} \right]$$

O método por localização geográfica foi o utilizado para prever a temperatura nos pavimentos, como referido anteriormente. Este encontra-se de forma detalhada no capítulo 4.

5.1.2 Materiais

Os materiais que constituem os pavimentos rodoviários têm dois tipos de comportamento. Os materiais que têm comportamento elástico, como recuperam a sua forma original após a acção de cargas, não influenciam o valor da deformação permanente. Os materiais que tem comportamento viscoelástico linear, como mantêm uma pequena deformação após cada carregamento, irão ser os responsáveis pela deformação permanente. Admite-se para ambos os que não atingem a cedência.

Quando se refere que os materiais viscoelásticos são influenciados pela temperatura significa que as suas características mecânicas, como o módulo de elasticidade e a viscosidade, tomam valores diferentes em função de temperaturas diferentes. Como foi então estabelecida a relação entre os valores de temperatura e os parâmetros E1, E2, η_1 e η_2 , necessários ao cálculo das extensões permanentes?

É possível para um material serem estabelecidas relações entre os valores de tempo de carga e do módulo de elasticidade realizando ensaios. Essas relações podem ser obtidas através de funções polinomiais de segundo grau.

$$f(x) = ae^{bx} + ce^{dx}$$

Nestas funções o tempo de carga será a variável independente e o módulo de elasticidade a variável dependente. Assumindo assim a seguinte expressão:

$$E(t) = E_1 e^{\frac{-E_1 t}{\eta_1}} + E_2 e^{\frac{-E_2 t}{\eta_2}}$$

$$a = E_1 \quad b = E_2 \quad c = \frac{-E_1}{\eta_1} \quad d = \frac{E_2}{\eta_2}$$

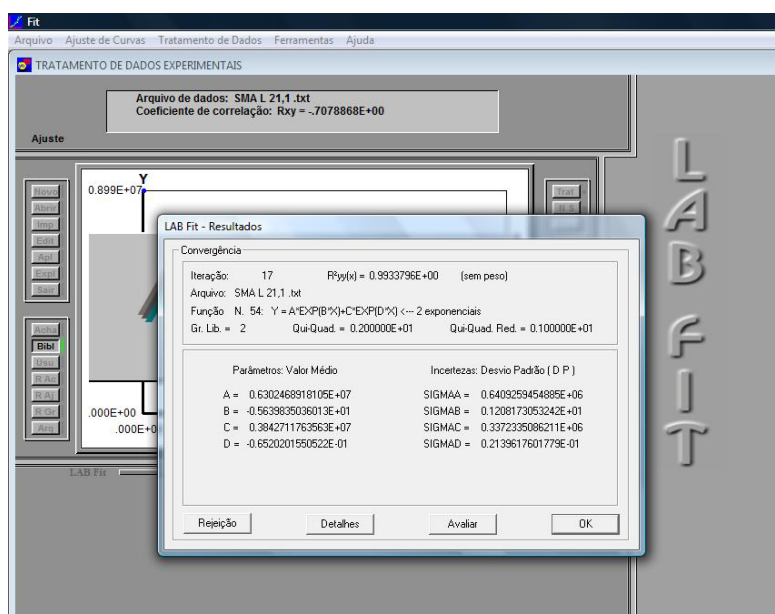
As constantes a, b, c e d assumem o significado acima demonstrado. Através de relações entre elas é possível conhecer o valor de cada parâmetro para uma determinada temperatura de ensaio. Se esses ensaios forem realizados a diversos tempos é possível relacionar-se a temperatura com cada um dos parâmetros.

Berhanu (Berhanu 2009) apresenta resultados de ensaios relacionando valores de temperatura com tempos de carregamento e módulos de elasticidade, para diversos tipos de materiais. Os diferentes materiais utilizados são: SMA (mistura betuminosa descontínua), HL (betão betuminoso) e SP 19 (misturas SUPERPAVE).

Recorreu-se ao programa “LAB Fit Ajuste” de forma a obter as constantes representativas de cada material, como se ilustra na figura 5.2

Quadro 5.2 - Registo de Ensaio de Berhanu (Berhanu 2009)

Mix	Frequency (Hz)	Time (sec)	Average Modulus (kPa)				
			-10.0°C	4.4°C	21.1°C	37.8°C	54.4°C
HL 3	25	0.04	29,035,597	18,234,080	8,517,013	3,677,663	1,771,922
	10	0.1	26,140,927	15,782,363	6,724,647	2,531,608	1,241,269
	5	0.2	23,758,520	14,155,470	5,632,195	2,001,509	1,062,556
	1	1	19,463,937	8,970,193	3,567,388	1,324,485	789,298
	0.5	2	17,024,643	8,410,651	2,903,347	1,139,088	723,110
	0.1	10	12,462,463	5,904,908	1,923,555	876,328	543,014
SMA L	25	0.04	28,328,933	17,781,917	8,991,958	3,787,753	1,635,066
	10	0.1	26,148,687	15,864,307	7,122,266	2,577,009	1,134,992
	5	0.2	22,299,133	14,503,093	6,005,836	2,018,145	939,640
	1	1	19,474,150	11,373,943	3,813,784	1,312,803	743,254
	0.5	2	16,197,897	10,030,364	3,115,649	1,124,041	698,482
	0.1	10	13,671,253	7,409,310	2,052,178	858,210	660,503
SMA G	25	0.04	21,880,647	14,303,734	5,971,156	2,475,618	1,401,389
	10	0.1	19,329,337	12,316,603	4,511,806	1,719,027	1,043,258
	5	0.2	17,532,513	10,777,247	3,689,282	1,406,425	903,193
	1	1	13,743,870	7,607,238	2,286,621	1,003,376	733,605
	0.5	2	12,003,197	6,335,759	1,868,067	902,241	683,879
	0.1	10	8,276,640	4,028,829	1,231,840	749,947	582,696
SP 19 D	25	0.04	30,403,193	21,183,310	11,078,390	5,898,574	2,975,443
	10	0.1	27,300,243	18,869,130	9,208,961	4,534,139	2,165,085
	5	0.2	25,117,033	17,367,207	8,078,782	3,780,130	1,806,861
	1	1	21,139,430	14,062,450	5,656,008	2,508,557	1,349,179
	0.5	2	18,947,950	12,841,303	4,764,570	2,127,961	1,224,906
	0.1	10	14,549,327	9,837,153	3,307,524	1,547,471	1,036,457
SP 19 E	25	0.04	27,417,293	19,913,503	10,709,234	4,847,736	2,234,002
	10	0.1	24,465,313	17,316,047	8,545,018	3,457,608	1,695,693
	5	0.2	22,305,090	15,563,347	7,151,440	2,817,195	1,484,138
	1	1	18,038,760	11,729,560	4,506,336	1,957,403	1,242,169
	0.5	2	15,865,667	10,040,225	3,606,568	1,725,655	1,175,920
	0.1	10	11,332,473	6,810,045	2,272,055	1,370,845	1,088,088

**Figura 5.2 – Programa “LAB FIT Ajuste”**

Tendo os valores de temperatura e dos parâmetros dos materiais, estabeleceu-se, para cada um deles, uma relação polinomial do quarto grau, sendo possível a partir daí para cada valor de temperatura, conhecer-se o valor de cada parâmetro, como se ilustra na figura 5.3 para o SMA G..

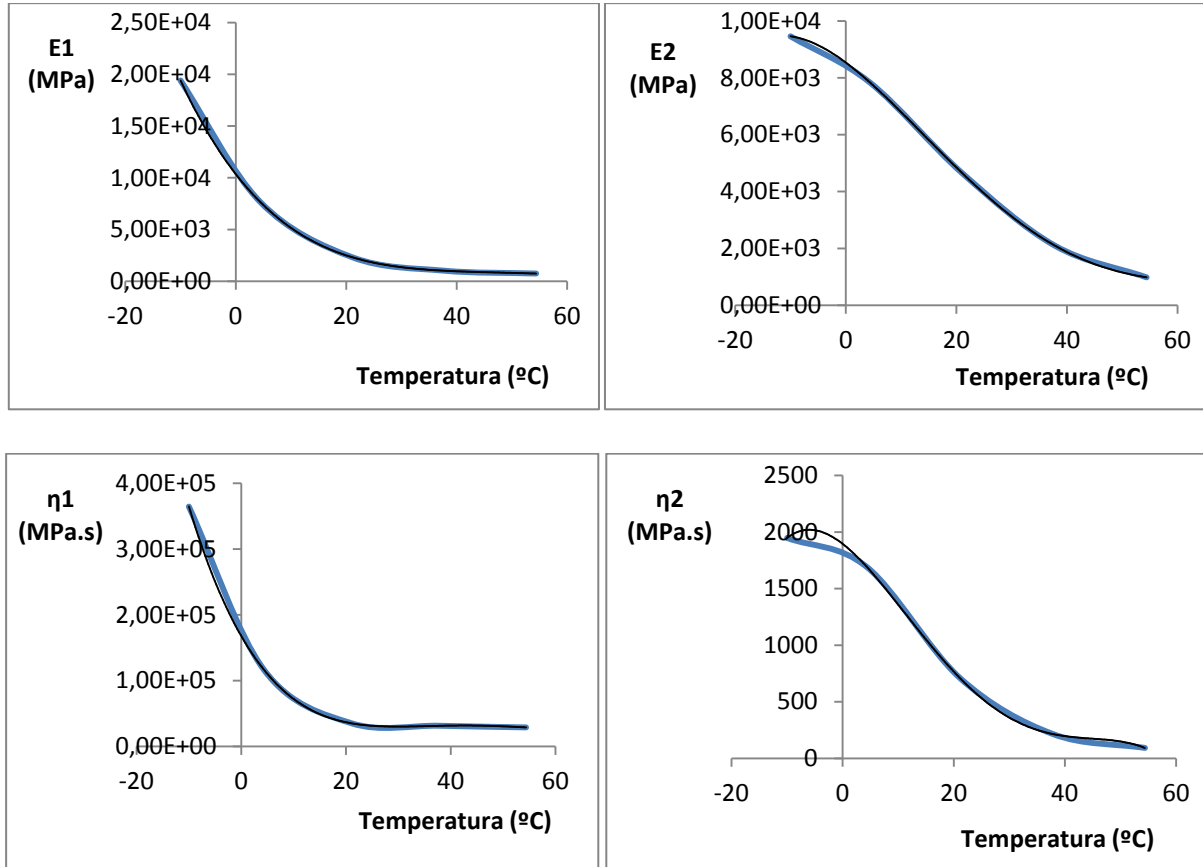


Figura 5.3 – Relação entre a temperatura e cada um dos parâmetros viscoelásticos para o material SMA G

Utilizando o modelo de Burgers, os parâmetros E1, E2, η1 e η2 de cada material são utilizados para determinar a extensão que cada material:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta_M} \times (t_1 - t_0) + \frac{\sigma_0}{E_K} \times e^{\left(-\frac{E_K}{\eta_k} \times (t - t_0)\right)} \times \left[1 - e^{\left(\frac{E_K}{\eta_k} \times (t - t_0)\right)}\right]$$

O programa DEFPERM no âmbito dos materiais reserva duas alternativas. A primeira consiste na escolha de um conjunto de cinco materiais. Os materiais são: SMA G, SMA L, HL3, SD 19D e SD 19E. A outra alternativa diz respeito à possibilidade de serem introduzidos os parâmetros (módulos de elasticidade e viscosidades) de cada material.

5.1.3 Geometria do Pavimento

O pavimento é assimilado a um conjunto de camadas assente sobre a fundação. A fundação, representada pela camada inferior, é considerada semi-infinita verticalmente. Na execução de um pavimento, os materiais são divididos em camadas sendo em cada uma considerados homogéneos e isotrópicos. Dentro de cada camada (viscoelástica), é possível separar-se cada uma destas em fatias. Uma consideração mais precisa da variação vertical das propriedades das camadas pode ser introduzida através de uma maior subdivisão de camadas. A aderência entre camadas pode ser total ou nula. Para cada fatia, representada pela sua linha média, é calculada a sua extensão tendo em conta as características dos materiais, o tempo da carga actuante e a tensão aplicada. A tensão aplicada para cada fatia é calculada através do programa ELSYM5 (inserido no DEFPERM), sendo que nas fatias superiores, mais perto da carga actuante, registam-se maiores valores de tensão.

Sabendo a extensão para cada fatia, é possível saber a sua deformação, multiplicando-a pela sua espessura. O somatório das deformações por fatia dará a deformação total.

5.1.4 Acções

No que toca ao tráfego, foi necessário considerar três aspectos. O primeiro relacionado com o valor das cargas dos veículos que actuam sobre cada pavimento, o segundo com as suas velocidades e o terceiro com a repetição dessas mesmas cargas.

Em relação ao valor das acções sobre o pavimento foi simplesmente considerado uma carga circular uniforme, aplicada à superfície do pavimento. O raio, a força e a consequente pressão, podem tomar os valores que o utilizador pretender.

A velocidade de uma carga influencia a deformação das misturas betuminosas, como vimos no capítulo 3. O efeito do deslocamento por acção de cargas rolantes é avaliado por linhas de influência. Relacionando a velocidade com o tempo é possível saber-se a posição que a carga ocupa. Integrando no tempo as tensões originadas por estas determina-se deformação total do pavimento. Este efeito é desprezável a partir de 2 metros de distância da carga. Assim, ao valor da velocidade introduzido pelo operador, associado ao valor de espaço percorrido de 2 metros, o programa sabe qual o valor de tempo necessário ao cálculo das extensões.

A deformação permanente é calculada para uma passagem de carga. Contudo os pavimentos são solicitados para um maior conjunto de veículos (cargas). Este programa assume que a relação entre o número de passagens e a deformação permanente é linear. Multiplica-se o número de passagens da carga pelo valor da deformação permanente (por carga), para se obter a deformação permanente total. O programa DEFPERM reserva duas possibilidades de contabilização do número de cargas. Ou considera que o tráfego assume uma distribuição uniforme, ou pode assumir uma distribuição representativa de determinados tipos de carga.

5.2 Programa DEFPERM

Foi visto anteriormente a forma como os diversos conteúdos teóricos se organizam de forma a se obter o valor de deformação no programa DEFPERM. Nesta secção pretende-se dar a conhecer um pouco melhor a estrutura do programa que permitiu toda a informação teórica ganhar corpo.

5.2.1 Estrutura do Programa

Como foi referido anteriormente, o programa DEFPERM tem por base o programa ELSYM5, sendo-lhe fornecidas as subrotinas necessárias ao cálculo de deformações de camadas viscoelásticas.

As subrotinas criadas, que estão na origem do programa DEFPERM são as seguintes: CALEND; DEFPERM; MATERIAIS; TEMPERAT; TMINMAX e TRAFEGO.

A subrotina CALEND permite determinar o dia do mês e o respectivo mês em função do dia do ano e do ano.

Em DEFPERM são calculadas as deformações em função da temperatura, dos parâmetros e da geometria de cada material. É a subrotina que relaciona todas as subrotinas criadas.

MATERIAIS é a subrotina que para cada camada viscoelástica devolve os módulos de elasticidade e as viscosidades utilizadas no modelo de Burgers.

Na subrotina TEMPERAT pode-se encontrar o modo de se prever a temperatura para uma um pavimento em função da sua profundidade, da localização e da data a que se pretendem obter informações de temperatura.

TMINMAX é a subrotina que fornece para cada ano os valores de temperatura mínima e máxima praticadas em cada região para cada ano.

Por fim a subrotina TRAFEGO que foi criada com o intuito de se apurar para cada hora o número de cargas que actuam no pavimento.

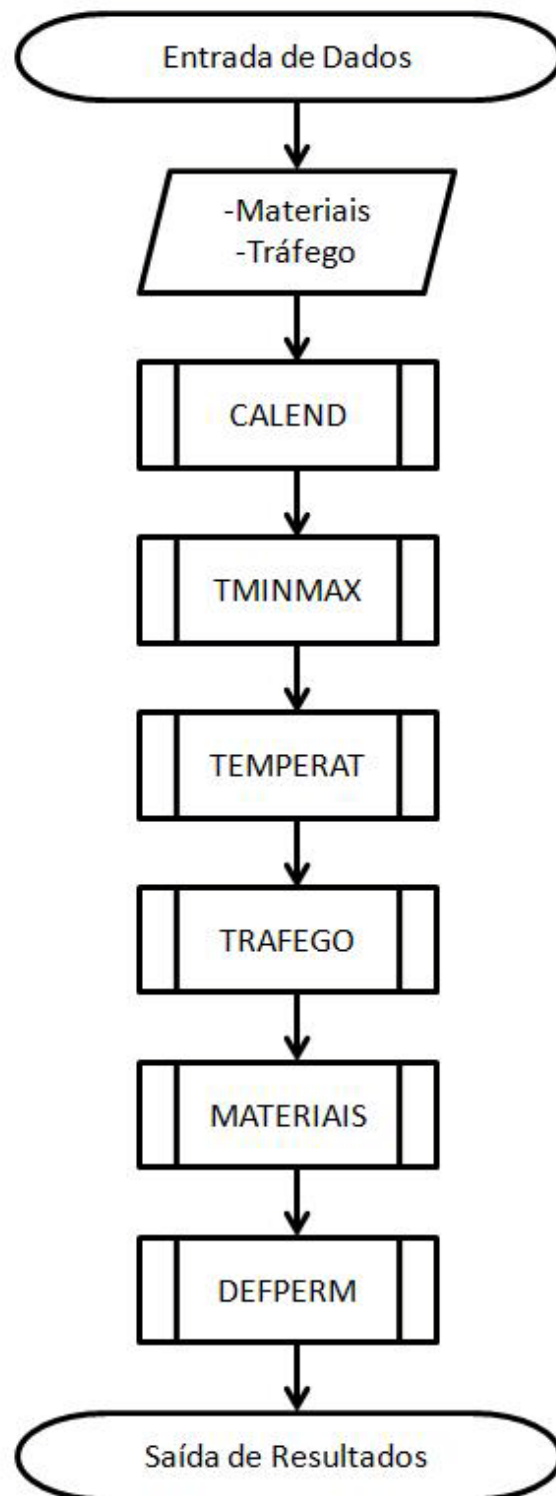


Figura 5.4 – Fluxograma DEFPERM

5.2.2 Leitura de Dados

A inserção dos dados é feita no denominado “ficheiro de dados”. A figura 5.5 mostra um exemplo desse tipo de ficheiro.

```

DEFPERM.DAD - Bloco de notas
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
1 3
Caso_de_carga_estatica
39.033 221 2011
7 1 1 4 4 5
1 .025 .35 10 0
2 .025 .35 10 0
3 .05 .35 10 0
4 .05 .35 10 0
5 .20 .35 100 0
6 1.50 .45 50 0
7 0 .35 2000000 0
300 114.3 0 .2025 0 0.025 0
0 0
0 0
0.0125
0.0375
0.075
0.125
0.025
0.025
0.05
0.05
0.000001
0.024999
0.0250001
0.1
1000000

```

Figura 5.5 – Ficheiro de dados

No ficheiro de dados encontram-se várias linhas, cada uma delas com diversos valores e cada um deles com a sua respectiva função. Na primeira linha o número 3 significa que o programa irá executar uma simulação para um cálculo estático, escrevendo na linha seguinte a informação respectiva. Na terceira linha encontram-se os espaços reservados para a latitude, para o dia e para o ano. O dia, na imagem com o valor de 221, representa o 221º dia dos 365 (ou 366) dias do ano, neste caso corresponde ao dia 10 de Agosto.

É neste âmbito que surge a subrotina CALEND. Esta subrotina lê os valores da do dia e do ano escritos e no ficheiro de dados e transforma-os na data a colocar no ficheiro de resultados. Tem portanto como variáveis de entrada o dia e o ano e como variáveis de saída o dia e o mês. O ano é uma variável de entrada pois é necessário perceber-se se o ano em questão é comum ou bissexto.

```
SUBROUTINE CALEND(dia,ano,d,mes)
Variaveis de entrada: dia,ano
Variaveis de saída : d,mes
#####
```

Figura 5.6 – Variáveis de entrada e saída da subrotina CALEND

A quarta linha (ficheiro de dados) controla praticamente toda a informação que resta até ao fim do ficheiro. O número 7 indica o número de camadas a serem consideradas, que se encontram descritas nas linhas 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11. Na quarta linha temos ainda dois números 1. O primeiro diz respeito ao número de posições no plano X-Y onde se pretende obter informações. O segundo número 1 diz respeito ao número de posições no plano X-Y onde irá ser colocada a carga actuante. Como este caso representa uma carga estática o número colocado é o um. O primeiro número 4 indica o número de profundidades onde irão ser obtidos resultados, estando o segundo número 4 relacionado com a subdivisão em fatias das camadas viscoelásticas. O último número desta linha diz respeito ao número de tempos em que se pretendem obter informações, neste caso 5 tempos.

Como foi dito anteriormente as linhas 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 descrevem as camadas existentes, sendo que cada linha está associada a uma camada. Assim para cada uma destas linhas é designado respectivamente o número da camada, a sua espessura, o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade.

A décima segunda linha está relacionada com as cargas actuantes no pavimento. O primeiro valor dessa linha, na imagem com o valor 300, corresponde ao número de passagens que a carga irá efectuar. Posteriormente é definido o valor da carga, sendo que essa definição pode ser feita definindo dois entre os três parâmetros: força, área e tensão. O antepenúltimo valor (0) e o penúltimo valor (0,025) são respectivamente os tempos de início e de fim de carga. O último valor

da linha está reservado para o valor da velocidade da carga, que por ser um exemplo de carga estática toma o valor de 0.

Nas linhas seguintes irão ser colocadas tantas linhas quanto o número de informações contabilizadas na quarta linha (excluindo a informação sobre as camadas que já foram definidas). Assim, iremos ter por exemplo na décima terceira linha a única posição definida no plano X-Y para a obtenção de leituras, pois o segundo número da quarta linha é o 1.

Nem todas as opções do programa DEFPERM são tomadas no ficheiro de dados. A figura 5.7 exhibe as opções que podem ser tomadas relativamente ao tráfego e aos materiais. Os materiais denominados “Pedro 1” e “Pedro 2” estão relacionados com o método de calibração.



```

CA
Quais os dados de trafego?
Uniforme ..... 1
Estrada interurbana ..... 2
2
Quais as características viscoelásticas?
Escolher da biblioteca de materiais tipo ..... 1
Fornecer resultados de ensaios ..... 2
Características fornecidas pelo utilizador ..... 3
1
Qual o material da camada 1?
SMA G ..... 1
HL3 ..... 2
SMA L ..... 3
SP 19 D ..... 4
SP 19 E ..... 5
Pedro_1 ..... 6
Pedro_2 ..... 7
1
Qual o material da camada 2?
SMA G ..... 1
HL3 ..... 2
SMA L ..... 3
SP 19 D ..... 4
SP 19 E ..... 5
Pedro_1 ..... 6
Pedro_2 ..... 7
1
Qual o material da camada 3?
SMA G ..... 1
HL3 ..... 2
SMA L ..... 3
SP 19 D ..... 4
SP 19 E ..... 5
Pedro_1 ..... 6
Pedro_2 ..... 7
1
Qual o material da camada 4?
SMA G ..... 1
HL3 ..... 2
SMA L ..... 3
SP 19 D ..... 4
SP 19 E ..... 5
Pedro_1 ..... 6
Pedro_2 ..... 7
1
1=

```

Figura 5.7 – Opções do programa DEFPERM

5.2.3 Temperatura

No âmbito da temperatura foram criadas duas subrotinas: TMINMAX e TEMPERAT.

A subrotina TMINMAX tem como variável de entrada o ano definido no ficheiro de dados. O ano é variável de entrada pois é necessário perceber-se novamente se o ano em questão é comum ou bissexto, para se perceber em que mês está localizado o dia inserido no ficheiro de dados. Esta distinção é fundamental pois as temperaturas mínimas e máximas estão definidas em função de cada mês, de acordo com os registos climáticos.

Como variáveis de saída o programa tem a temperatura mínima e máxima do dia colocado no ficheiro de dados. Estas variáveis são necessárias quando se pretende definir a temperatura num pavimento.

```
SUBROUTINE TMINMAX(ano,tmin,tmax)
Variaveis de entrada: ano
Variaveis de saída : tmin,tmax
#####
```

Figura 5.8 – Variáveis de entrada e saída da subrotina TMINMAX

O método utilizado para definir a temperatura no pavimento no programa DEFPERM é o método por localização geográfica. A subrotina TEMPERAT não é mais que aplicação deste método. Uma vez que este método necessita dos valores máximos e mínimos de temperatura, a subrotina TEMPERAT relaciona-se com a subrotina TMINMAX na medida em que os dados de saída desta última são dados de entrada da subrotina TEMPERAT. Os restantes dados de entrada desta subrotina são o dia a latitude o ano e a hora. O dia, a latitude e o ano vêm da leitura do ficheiro de dados. A hora define qual das expressões do método por localização deve ser utilizada para o cálculo da temperatura.

A subrotina TEMPERAT tem como variável de saída a temperatura para as diversas profundidades definidas no ficheiro de dados.

```
SUBROUTINE TEMPERAT (DIA,HORA,PROF1,TMAX,TMIN,LAT,TEMPzz,ano)
Variaveis de entrada: DIA,HORA,TMAX,TMIN,LAT,ano
Variaveis de saída : TEMPz
#####
```

Figura 5.9 – Variáveis de entrada e saída da subrotina TEMPERAT

5.2.4 Tráfego

A contabilização do número de cargas que actuam no pavimento como solicitação à estrutura recorre à subrotina TRAFEGO.

A variável de entrada desta subrotina é a taxa média diária anual do número de cargas actantes. O valor desta taxa é lido no ficheiro de dados. Porém é ainda necessário definir-se a distribuição que se pretende simular. As opções para a distribuição das cargas encontram-se no menu de opções e é nesta janela que é definida esta escolha.

O que sai como variável da subrotina TRAFEGO é o número de cargas associado a cada valor horário. Esta informação é encaminhada para o programa principal repetindo o cálculo das deformação tantas vezes quanto o número de cargas horárias.

```
SUBROUTINE TRAFEGO (TMDA,NVEIC)
Variaveis de entrada: TMDA
Variaveis de saída  : NVEIC
#####
```

Figura 5.10 – Variáveis de entrada e saída da subrotina TRAFEGO

5.2.5 Materiais

A subrotina MATERIAIS é a responsável pela escolha do tipo de mistura viscoelástica a ser seleccionada para cada camada do pavimento. Como foi referido existem várias hipóteses de serem definidos os materiais envolvidos. Uma das possibilidades consiste na selecção feita a partir de uma biblioteca de materiais definida no programa. Os parâmetros característicos de cada material são definidos em função da temperatura por funções polinomiais do quarto grau. Quando se selecciona um material, o programa define os coeficientes da função polinomial a serem utilizados.

A variável de entrada deste programa é o número de camadas viscoelásticas e as variáveis de saída são, não os parâmetros de cada material, mas sim os seus coeficientes que juntamente com o valor da temperatura permitem calcular os módulos de elasticidade e as viscosidades, necessárias ao cálculo das extensões da mistura.

A geometria e consequentemente o número de camadas viscoelásticas são definidas no ficheiro de dados. A eventual selecção de materiais fornecidos pelo DEFPERM, assim como a selecção dos mesmos é definida camada a camada no menu de opções.

A subrotina MATERIAIS enviará os seus resultados para o programa, sendo essa informação posteriormente utilizada na subrotina DEFPERM.

```
SUBROUTINE MATERIAIS (nvisco,e1,e2,n1,n2)
Variaveis de entrada:  nvisco
Variaveis de saída  :   e1,e2,n1,n2
#####
```

Figura 5.11 – Variáveis de entrada e saída da subrotina MATERIAIS

5.2.6 Deformação

No âmbito do cálculo da deformação, objectivo final do programa DEFERM, surge a subrotina com o mesmo nome. O objectivo desta subrotina é calcular a deformação do pavimento camada a camada para as diferentes horas do dia. Para cada hora determina a deformação total apresentando um somatório para cada dia.

Esta subrotina, como subrotina final, recorre a todas as características determinadas pelas subrotinas que lhe antecedem para realizar em primeiro lugar o cálculo das propriedades das misturas, em função da temperatura definida anteriormente na subrotina TEMPERAT. Em segundo lugar realiza o cálculo da extensão e da consequente deformação para cada camada com base no modelo de Burgers.

```

SUBROUTINE DEFPERM(DIA,hor,ITIP,NXY,NZ,LAY,AS,E1,E2,N1,N2,T1,T2,T,
&NT,ESP,DEFPP,TEMP,E01,E02,N01,N02)

Variaveis de entrada: AS,E1,E2,N1,N2,TEMP
Variaveis de saída :
#####

```

Figura 5.12 – Variáveis de entrada e saída da subrotina DEFPERM

5.2.7 Saída de Resultados

A obtenção dos resultados apresenta-se num tipo de ficheiro designado de “ficheiro de resultados”. A figura 5.13 mostra um exemplo desse tipo de ficheiro.

DEFORMAÇÃO (mm) HORA=1					
PROFUNDIDADE	T1	T2	T3	T4	T5
d=0.0125m	0.00876015	0.01133000	0.00257005	0.00113969	0.00021900
d=0.0375m	0.00798575	0.01032842	0.00234286	0.00103894	0.00019964
d=0.0750m	0.00836545	0.01193938	0.00357421	0.00140778	0.00060997
d=0.1250m	0.00395044	0.00563817	0.00168786	0.00066480	0.00028804
TOTAL	1.45646334	1.46663749	0.01017499	0.00425122	0.00131666

DEFORMAÇÃO (mm) HORA=2					
PROFUNDIDADE	T1	T2	T3	T4	T5
d=0.0125m	0.00876015	0.01133000	0.00257005	0.00113969	0.00021900
d=0.0375m	0.00798575	0.01032842	0.00234286	0.00103894	0.00019964
d=0.0750m	0.00836545	0.01193938	0.00357421	0.00140778	0.00060997
d=0.1250m	0.00395044	0.00563817	0.00168786	0.00066480	0.00028804
TOTAL	1.45646334	1.46663749	0.01017499	0.00425122	0.00131666

Figura 5.13 – Ficheiro de resultados

Na figura 5.13 estão calculadas as diversas deformações em função da hora do dia, da profundidade e do tempo. Estes tempos são tempos de leitura, nada tendo a ver com o tempo de carga definido no ficheiro de dados. Como se pode notar, as deformações são iguais para as duas horas na imagem (e também para as restantes). Este motivo é explicado por se tratar de um caso de carregamento estático, pelo que o tráfego é considerado uniforme. A deformação total é a soma das diversas deformações horárias.

De referir que o INPUT e o OUTPUT nas imagens não são relatam o mesmo caso.

5.3 Validação do Método

Para averiguar sobre a qualidade do método DEFPERM, foi necessário comparar os resultados por ele obtidos, com resultados de outras publicações. No caso da presente dissertação foi escolhida a tese de mestrado de Ferreira (Ferreira 2001).

Foram comparados dois resultados que irão de seguida ser apresentados: Carga Estática e Carga Dinâmica.

5.3.1 Carga Estática

Ferreira começa por definir uma estrutura de pavimento composta por duas camadas betuminosas, uma camada granular e uma fundação com um módulo de elasticidade muito elevado. Essa estrutura é possível de identificar na figura 5.14. Na mesma figura é ainda possível identificar as características (espessura, módulos de elasticidade, viscosidades e coeficiente de Poisson) para cada camada. De referir que a presença de dois módulos de elasticidade e de duas viscosidades está relacionada com modelo adoptado (Modelo de Burgers).

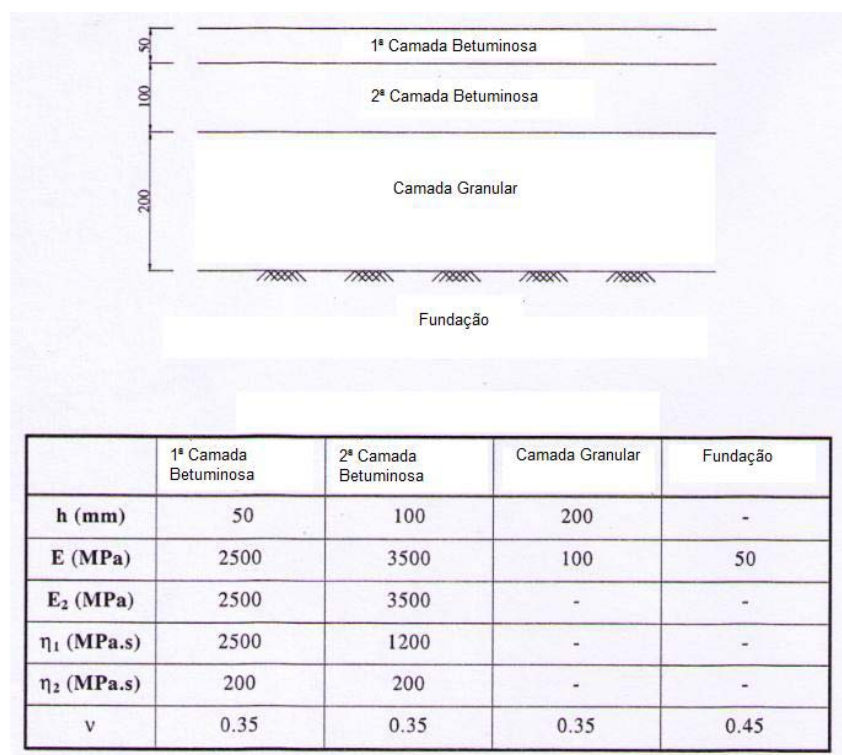


Figura 5.14 – Estrutura e características do modelo de comparação (Ferreira 2001)

A carga aplicada a esta estrutura consiste numa pressão constante de 0,9 MPa aplicada numa área de 460x280 mm² durante 0,025 segundos.

Para estas condições o resultado apresentado por Ferreira, utilizando o programa CREEPN, que recorre um método de elementos finitos, foi de 0,001267 mm de deformação permanente.

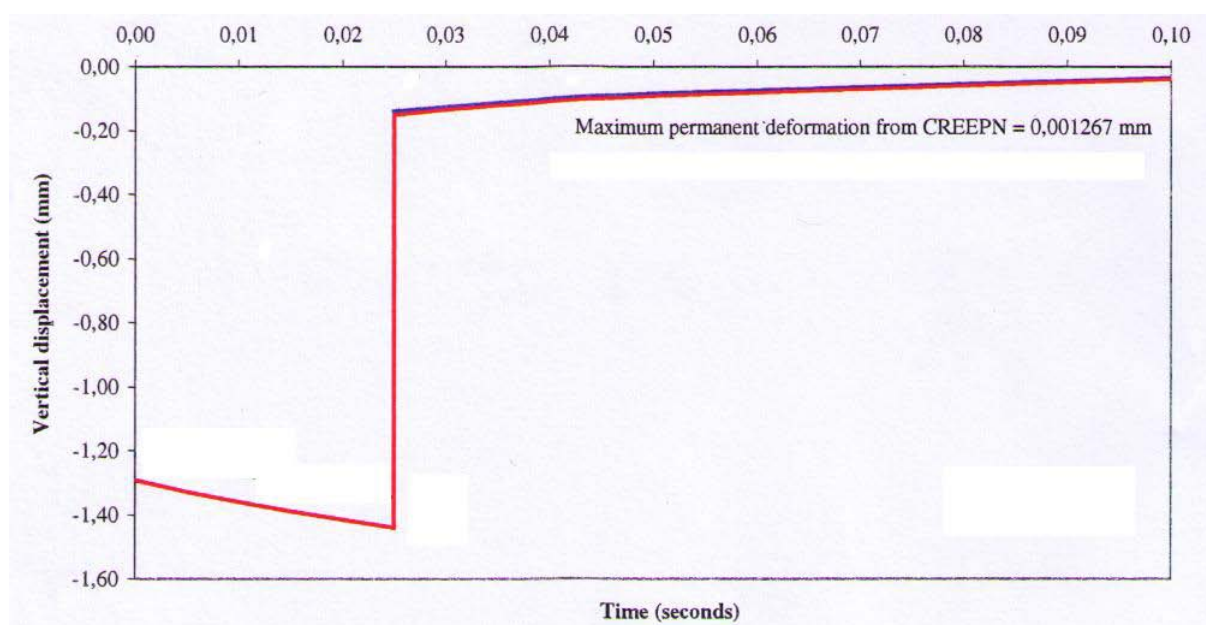


Figura 5.15 – Resultado do modelo de comparação para carga estática (Ferreira 2001)

O programa DEFPERM, apresentado na presente dissertação, obteve, para as mesmas condições, três diferentes resultados. Estes três resultados diferem no modo como foram divididas em fatias as camadas viscoelásticas de forma a poder ser avaliado o rigor na distribuição de tensão por cada camada viscoelástica, e consequentemente as deformações daí resultantes. Os resultados encontram-se na figura 5.16:

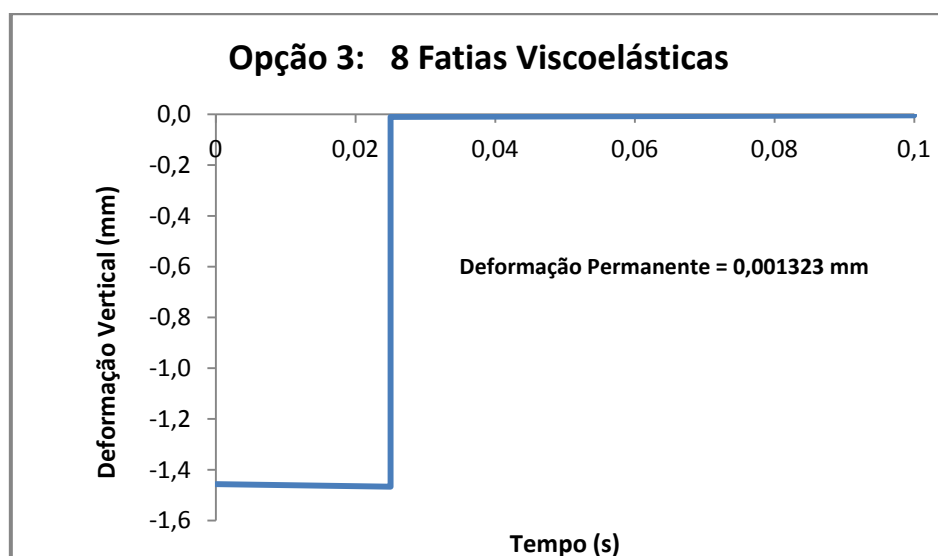
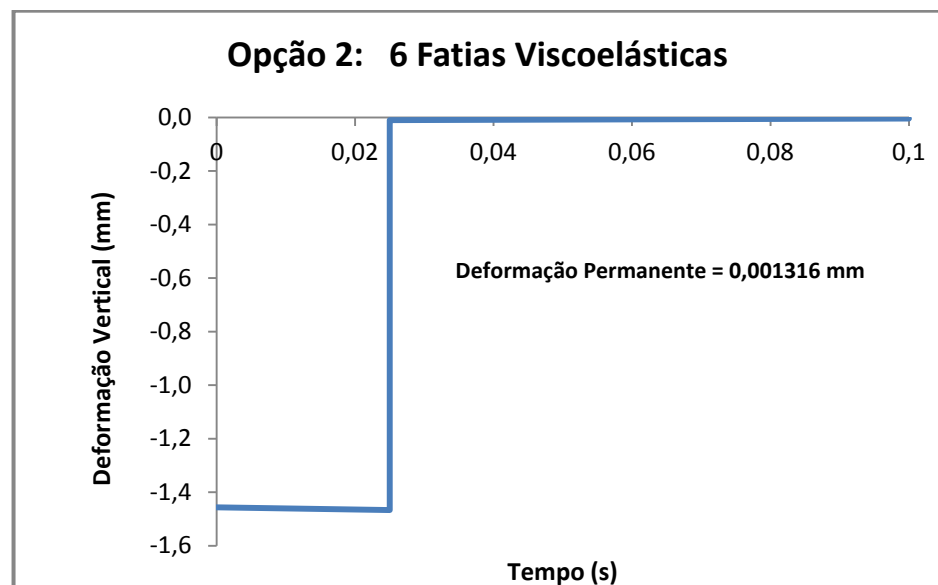
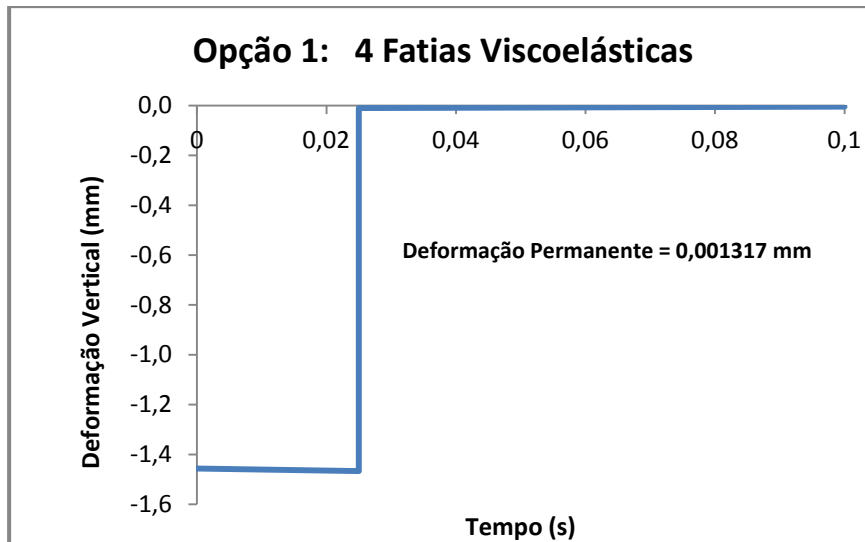


Figura 5.16 – Resultados DEFPERM para três subdivisões de camadas – carga estática

Constata-se que os resultados obtidos para as três hipóteses são praticamente coincidentes com o resultado obtido para a deformação do caso de referência, podendo as três ser utilizadas. Contudo, e uma vez que os valores para as três hipóteses são muito próximos, não se justifica utilizar uma maior subdivisão de camadas do que aquela utilizada para a “opção 1” (duas divisões por cada camada viscoelástica).

5.3.2 Carga Dinâmica

A situação envolvendo uma carga dinâmica, que teve como objectivo simular a passagem de um veículo, consiste no segundo método de verificação de resultados utilizado.

Nesta situação, Ferreira (Ferreira 2001) utiliza a mesma estrutura e materiais que havia utilizado para simular uma carga estática. O que mudou neste caso, como o título sugere, foi o modo de aplicação da carga. A acção aplicada consiste apenas numa única passagem de uma carga com uma tensão de 0,9 MPa, aplicada numa mesma área, a uma velocidade de 5,56 m/s (20 km/h).

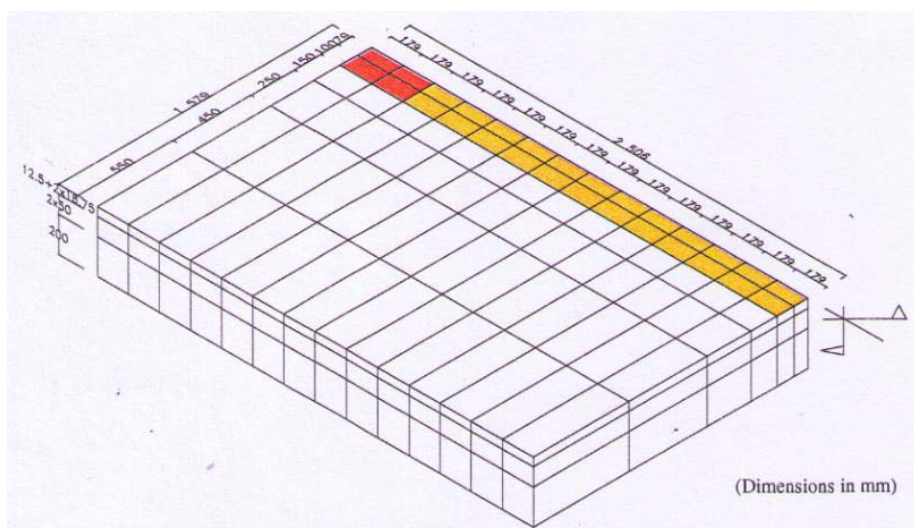


Figura 5.17 – Percurso efectuado pela carga dinâmica para o modelo de comparação (Ferreira 2001)

O resultado apresentado por Ferreira, utilizando o programa CREPEN, foi de 0,004099 mm de deformação permanente.

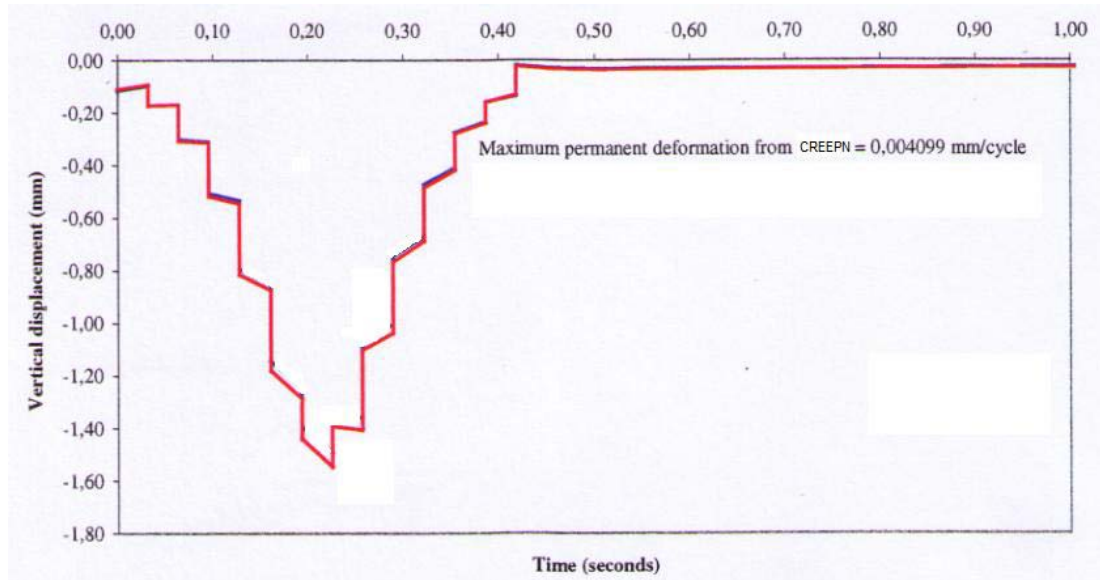


Figura 5.18 – Resultado do modelo de comparação para carga estática (Ferreira 2001)

O programa DEFPERM, considerando uma subdivisão em quatro camadas viscoelásticas, obteve para semelhante situação uma deformação permanente de 0,00421 mm. Estes resultados encontram-se na figura 5.19.

DEFPERM.dat - Bloco de notas

FicheiroEditarFormatarVerAjuda

HORA = 1

PROF.	PASSAGENS	TEMP	E1	E2	N1	N2	DEF.	PERM
0.0125	1	30.2	2500.	2500.	2500.	200.	0.779E-03	
0.0375	1	30.4	2500.	2500.	2500.	200.	0.703E-03	
0.0750	1	30.4	3500.	3500.	1200.	200.	0.203E-02	
0.1250	1	30.2	3500.	3500.	1200.	200.	0.706E-03	
TOTAL DA HORA 1							-----	0.421E-02 mm

HORA = 2

PROF.	PASSAGENS	TEMP	E1	E2	N1	N2	DEF.	PERM
0.0125	1	26.6	2500.	2500.	2500.	200.	0.779E-03	
0.0375	1	27.1	2500.	2500.	2500.	200.	0.703E-03	
0.0750	1	27.6	3500.	3500.	1200.	200.	0.203E-02	
0.1250	1	28.1	3500.	3500.	1200.	200.	0.706E-03	
TOTAL DA HORA 2							-----	0.421E-02 mm

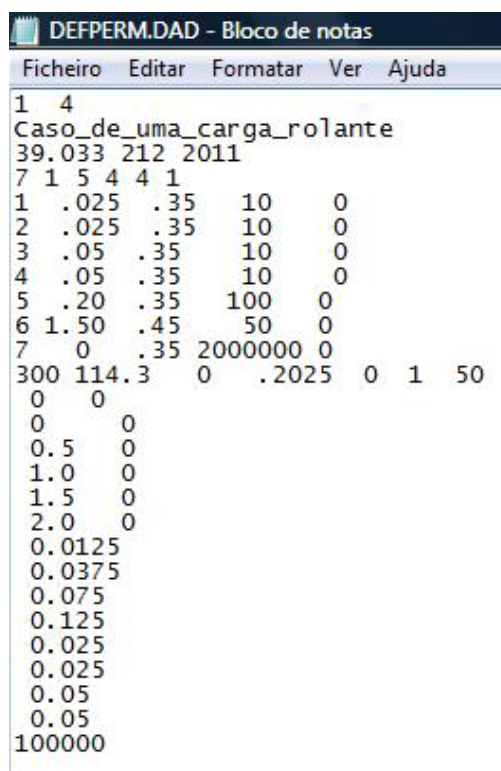
Figura 5.19 – Resultado do programa DEFPERM para carga dinâmica

5.4 Caso de Estudo

Como o intuito de se proceder à elaboração de um exemplo de aplicação do programa DEFPERM procedeu-se à elaboração de um caso de estudo. Este caso teve ainda como segundo objectivo a tentativa de aproximação a uma situação o mais semelhante possível com a realidade rodoviária. As características deste caso encontram-se no quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Características do Caso de Estudo

Localização: Salvaterra de Magos
Data: 31 de Julho de 2011
Estrutura de Pavimento: (Indicado no Ficheiro de Dados)
Material das Camadas Betuminosas: SMA L
Tráfego: Estrada Interurbana com tráfego médio diário equivalente a 300 passagens de um eixo padrão de 130 kN
Velocidade: 50 Km/h



```

DEFPERM.DAD - Bloco de notas
Ficheiro  Editar  Formatar  Ver  Ajuda
1  4
Caso_de_uma_carga_rolante
39.033 212 2011
7 1 5 4 4 1
1 .025 .35 10 0
2 .025 .35 10 0
3 .05 .35 10 0
4 .05 .35 10 0
5 .20 .35 100 0
6 1.50 .45 50 0
7 0 .35 2000000 0
300 114.3 0 .2025 0 1 50
0 0
0 0
0.5 0
1.0 0
1.5 0
2.0 0
0.0125
0.0375
0.075
0.125
0.025
0.025
0.05
0.05
100000
  
```

Figura 5.20 – Ficheiro de dados do caso de estudo

DEFPERM.dat - Bloco de notas

Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda

HORA = 16

PROF.	PASSAGENS	TEMP	E1	E2	N1	N2	DEF.	PERM
0.0125	15	46.9	867.	1136.	31385.	26.	0.374E-03	
0.0375	15	43.9	907.	1387.	31764.	70.	0.345E-03	
0.0750	15	40.2	969.	1746.	31667.	119.	0.542E-03	
0.1250	15	36.6	1060.	2167.	31113.	177.	0.319E-03	
TOTAL DA HORA 16							-----	0.158E-02 mm

HORA = 17

PROF.	PASSAGENS	TEMP	E1	E2	N1	N2	DEF.	PERM
0.0125	17	45.8	881.	1220.	31567.	42.	0.421E-03	
0.0375	17	43.3	916.	1440.	31788.	77.	0.390E-03	
0.0750	17	40.1	972.	1763.	31650.	121.	0.613E-03	
0.1250	17	36.7	1057.	2155.	31131.	175.	0.361E-03	
TOTAL DA HORA 17							-----	0.179E-02 mm

HORA = 24

PROF.	PASSAGENS	TEMP	E1	E2	N1	N2	DEF.	PERM
0.0125	8	33.4	1177.	2584.	30525.	243.	0.205E-03	
0.0375	8	33.3	1184.	2607.	30497.	247.	0.189E-03	
0.0750	8	32.7	1209.	2681.	30416.	260.	0.287E-03	
0.1250	8	31.9	1253.	2806.	30300.	282.	0.155E-03	
TOTAL DA HORA 24							-----	0.836E-03 mm

TOTAL DO DIA 31. JUL. 2011 300. PASSAGENS >>

Figura 5.21 – Ficheiro de resultados para o caso de estudo

A deformação permanente registada para este caso de dia 31 de Julho em Salvaterra de Magos é de aproximadamente 0,03 mm, como é possível de constatar na figura 5.21.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTO FUTURO

6.1 Considerações

O presente trabalho definiu como objectivo efectuar uma avaliação do comportamento das misturas betuminosas em função de elevadas temperaturas às quais estas estão sujeitas em serviço, nomeadamente a estimar a sua deformação permanente.

As misturas betuminosas entre outros componentes, têm na sua constituição betume. O betume é um material viscoelástico que se comporta como um sólido elástico para temperaturas baixas e comporta-se como um fluído viscoso para temperaturas altas. A resposta do betume à tensão aplicada depende da temperatura e tempo de carga aplicada. Para relacionar as tensões com as extensões são utilizados modelos reológicos. Dos modelos reológicos que representam este comportamento foi adoptado o modelo de Burgers.

A temperatura tem uma grande influência nas camadas betuminosas e consequentemente nos pavimentos. Para se prever a deformação de um pavimento é necessário conhecer todas as temperaturas a que este vai estar sujeito, nomeadamente nas altas temperaturas de serviço. Para estas temperaturas o controlo da deformação em pavimento assume um papel fundamental.

Tendo em vista o objectivo final foi preparada uma metodologia que contempla não só a influência da temperatura como também os restantes parâmetros que influenciam este mesmo objectivo tais como os materiais, a geometria do pavimento e as acções de tráfego. Para tornar esta metodologia de maior simplicidade foi elaborado o programa DEFPERM que permitiu, em função das variáveis atrás referidas determinar o valor de deformação nos pavimentos.

O programa DEFPERM foi testado e calibrado de modo a poderem ser dadas garantias sobre a qualidade dos seus resultados. Foi ainda apresentado um caso de estudo para um dia de Verão em Salvaterra de Magos.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Um dos principais passos a seguir para dar continuidade a este trabalho é dotar o programa DEFPERM de uma maior biblioteca de materiais. Nesse sentido, é recomendado a realização de ensaios de diferentes tipos de misturas betuminosas igualmente em função da temperatura. Para o mesmo tipo de misturas betuminosas recomenda-se ainda a utilização de diferentes tipos de betume para realização destes ensaios.

Uma vez que para a metodologia utilizada não foi considerado que os materiais pudessem atingir a região de cedência, outra sugestão seria avaliar o comportamento dos pavimentos para este estado.

Outra continuidade do presente trabalho será a utilização do programa DEFPERM para uma análise de adaptação do tipo de betume às diferentes condições climáticas e de tráfego, de forma a poder ser facilitada a escolha de misturas betuminosas para pavimentos.

Para uma melhor garantia na qualidade dos resultados recomenda-se ainda a comparação de resultados do programa com valores obtidos por observação de valores registrados para pavimentos da rede de estradas nacionais.

7 BIBLIOGRAFIA

(Airey 1997) – AIREY, G.D. – *Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens*, PhD Thesis, University of Nottingham. 1997

(Anderson *et al.* 1994) – ANDERSON, D.A., CHRISTENSEN, D. W., BAHIA, H.U., DONGRE, R., SHARMA, M.G., ANTLE, C.E. and BUTTON, J. – *Binder Characterization, Volume 3: Physical Characterization*. SHRP. Washington, D.C.. 1994.

(Aquino 2000) - AQUINO, L. – *Deformação Permanente em Misturas Betuminosas: Metodologia para o Cálculo da Temperatura de Serviço*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra. Coimbra. 2000.

(Asphalt Institute 1983) – The Asphalt Institute – *Asphalt technology and construction practices*, Maryland, 1983.

(Asphalt Institute 1997) – Asphalt Institute – *Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing. SUPERPAVE Asphalt Binder Specification*. Maryland. 1997.

(Attwoll & Broome 1962) – ATTWOLL, A. W., BROOME D. C. – *Trinidad lake asphalt*. The Baynard Press, Londres. 1962.

(Baaj 2002) – BAAJ, H. – *Comportement à la fatigue des Matériaux Granulaires traités aux Liants Hydrocarbonés*. These soutenue devant L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Lyon, France. 2002.

(Berhanu 2009) – BERHANU, F. – *Analysis and Modeling of Rutting for Long Life Asphalt Concrete Pavement*. Darmstadt. 2009.

(Bernucci *et al.* 2007) – BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. PETROBRÁS Asfaltos e ABEDA. Rio de Janeiro, Brasil. 2007.

(Collins *et al.* 1991) – COLLINS, J. H.; BOULDIN, M.G.; GELLES, R.; BERKER, A. – *Improved Performance of Paving Technologists*, 1991.

(Corbett 1969) – CORBETT, L. C. – *Composition of Asphalt Based on Generic Fractionation Using Solvent Dishalting, Elution-Adsorption Chromatography, and Densimetric Characterization*, Analytical Chemistry, 1969.

(CRR 1997) – Centre de Recherches Routières (CRR) – *Code de Bonne Pratique pour la formulation des enrobés bitumineux*. 1997.

(Dormon 1969) – DORMON, G. M. – *Some observations on the properties of bitumen and their relation to performance in practice and specifications*, Proceedings of the First Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Durban. 1969.

(Dukatz & Anderson 1980) – DUKATZ, E.L. and ANDERSON, D.A. – *The effect of various fillers on the mechanical behavior of asphalt and asphalt concrete*. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. 1980.

(Eurobitume 1996) – Eurobitume - *Glossary of Rheological Terms – A Practical Summary of the Most Common Concepts. Rheology of Bituminous Binders*, Eurobitume, 1996.

(Ferreira 2001) – FERREIRA, P. – *Previsão de Deformações Permanentes em Camadas Betuminosas de Pavimentos Rodoviários*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico. Lisboa. 2001.

(Ferry 1980) – FERRY, J.D. – *Viscoelastic Properties of Polymers*, John Wiley, New York. 1980.

(Filho 2009) – FILHO, A. – *Análise Laboratorial de Misturas Asfálticas Abertas Usinadas a Quente com a Utilização de Diferentes Ligantes*. Ouro Preto, Brasil. 2009.

(Freire 2002) – FREIRE, A. – *Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas em Pavimentos Rodoviários*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra. Coimbra. 2002.

(Gardete 2006) – GARDETE, D. – *Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra. Coimbra. 2006.

(Goodrich 1988) – GOODRICH, J.L. – *Asphalt and Polymer Modified Asphalt Properties Related to the Performance of Asphaltic Concrete Mixes*. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. 1988.

(Harris & Stuart 1995) – HARRIS, B.L.M. & STUART, K.D. – *Analysis of Mineral Fillers and Mastics Used in Stone Matrix Asphalt*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT. Portland, Oregon, USA. 1995.

(Heukelom 1973) – HEUKELOM, W. – *An improved method of characterizing asphaltic bitumens with the aid of their mechanical properties*, KSLA. 1973.

(Houben 1999) – HOUBEN, L., Visser, A. and van Dommelen, A. *Summary of Lintrack Research into Rutting of Asphalt Concrete Test Pavement 1999/2000; Report Summary for COST334*. Delft University of Technology Road and Railroad Research Laboratory, Delft. 1999.

(Huang 1993) – HUANG, Y. H. – *Pavement Analysis and Design*. University of Kentucky, Prentice-Hall Inc, New Jersey. 1993.

(IGPAI 1968) – Inspeção Geral dos Produtos Agrícolas e Industriais - *NP 142 – Ensaio de compressão Marshall*. Lisboa, 1968.

(Kandhal *et al.* 1997) – KANDHAL P.S.; PARKER F.J.; MALLICK, R. B. – *Aggregate Tests for Hot Mix Asphalt: State of the Practice*. USA. 1997.

(Kraemer 1996) – KRAEMER, C. – *Caminos y Aeropuertos: Firmes e Pavimentos*. Departamento de Transportes, Universidade Politecnica de Madrid, Madrid, 1996.

(LNEC 1969) - LNEC, *E-233 – Especificação 233. Agregados, Análise Granulométrica*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, Portugal. 1969.

(Lombardi 1993) – LOMBARDI, B. – *Du pétrole brut au bitumen: la longue marche*. Revue Général des Routes et des Aérodrômes. 1993.

(Motta & Leite 2000) – MOTTA, L.M.G. & LEITE, L.F.M. – *Efeito do Filer nas Características Mecânicas das Misturas Asfálticas*. Anais do 11º Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte. Gramado, Rio Grande do Sul, Brasil. 2000.

(Momm 1998) – MOMM, L. – *Estudo dos Efeitos da Granulometria sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, Brasil. 1998.

(Pais 1999) – PAIS, J.C. – *Consideração da Propagação de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis*. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal, 1999.

(Partl & Francken 1998) – PARTL, M.N. & FRANCKEN, L. – *Background of RILEM Interlaboratory Tests. Basic Elements of a Testing Methodology for Bituminous Pavement Materials and Significant Features for Testing*. RILEM Bituminous Binders and Mixes. Brussels, Belgium. 1998.

(Petersen 1984) – PETERSEN, J.C. – *Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability: State of Art*, TRR999, Transportation Research Board, Washington D.C.. 1984.

(Petersen *et al.* 1994) – PETERSEN, J.C., ROBERTSON, R.E., BRANTHAVER, J.F., HARNSBERGER, P.M., DUVALL, J.J., KIM, S.S., ANDERSON, D.A., CHRISTENSEN, D.W., BAHIA, H.U., DONGRE, R., SHARMA, M.G., ANTLE, C.E., BUTTON, J.W. and GLOVER, C.J. – *Binder Characterization and Evaluation, Volume 4: Test Methods*. SHRP-A-370, Strategic Highways Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1994.

(Pfeiffer & Van Doormal 1936) – PFEIFFER, J. Ph.; VAN DOORMAL, J. – *The rheological properties of asphaltic bitumen*, Inst. Petrol. 1936.

(Pink *et al.* 1980) – PINK, H.S., MERZ, R.E. and BOSNIACK, D.S. – *Asphalt Rheology: Experimental Determination of Dynamic Moduli at Low Temperatures*. Proceedings of the Association of Asphalt Technologists, 1980.

(Prithvi *et al.* 2002) – PRTHVI, S. K.; ALLEN COOLEY, L. A. – Evaluation of Permanent Deformation of Asphalt Mixtures Using Load Wheel Tester, Alabama, USA. 2002.

(Romberg *et al.* 1959) – ROMBERG, J.W., NESMITTS, S.D. and TRAXLER, R.N. – *Some Chemical Aspects of the Components of Asphalt*, Journal of Chemical and Engineering Data. 1959.

(Silva 2005) – SILVA, H. – *Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique – Contribuição para o Estudo do comportamento de Misturas Betuminosas*. Tese de Doutorado, Universidade do Minho. 2005.

(SHELL 1978) – SHELL International Petroleum Company - *Shell pavement manual. Asphalt pavements and overlays for road traffic*, London, 1978.

(SHELL 1991) – SHELL International Petroleum Company – *Shell bitumen hand book* - Shell Bitumen U.K., Chertsey, 1991.

(SHRP 1994a) – SHRP 1994a – *Permanent Deformation Response of Asphalt Aggregate Mixes. SHRP-A-415*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.. 1994.

(SHRP 1994b) – SHRP 1994b – *Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): An Optional Superpave Mix Design Tool. SHRP-A-698*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.. 1994.

(Teixeira 2000) – TEIXEIRA, A. – *Caracterização da resistência à fadiga de misturas betuminosas em equipamento servopneumático*. – Tese de Mestrado da Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto. Porto. 2000

(Traxler 1936) – TRAXLER, R.N. – *The physical Chemistry of Asphaltic Bitumen*, Chemical Review. 1936

(Van der Poel 1954) – VAN DER POEL, C. – *A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumen and its Relation to Routine Test Data*. Journal of Applied Chemistry. 1954.

(Whiteoak 2003) – WHITEOAK, C. D. – *The Shell Bitumen Handbook*. Surrey, UK: Shell Bitumen, 2003.

(Yildirim & Kennedy 2001) – YILDIRIM Y. and KENNEDY T. – *Correlation of Field Performance to Hamburg Wheel Tracking Device Results*. Center For Transportation Research, University of Texas, Austin. 2001.

(Zakar 1971) – ZAKAR, P. – *Asphalt*. New York: Chemical Publishing Company, 1971.

(Zhou *et al.* 2004) - ZHOU, F., Scullion, T. and Sun, L. (2004). *Verification and Modeling of Three-Stage Permanent Deformation Behavior of Asphalt Mixes*. *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 130, N.º 4, pp. 486-494. 2004.